







LE RADIUM

SA PRÉPARATION ET SES PROPRIÉTÉS

JACQUES DANNE
PRÉPARATEUR PARTICULIER DE M. CURIE
A L'ÉCOLE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES DE PARIS

LE RADIUM

PRÉPARATION ET SES PROPRIÉTÉS

PRÉFACE

DE

M. Ch. LAUTH

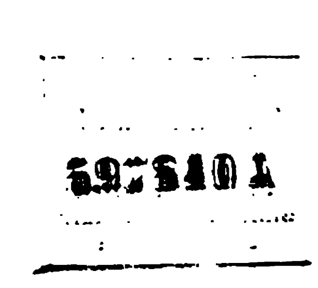
TEUR DE L'ÉCOLE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES DE PARIS

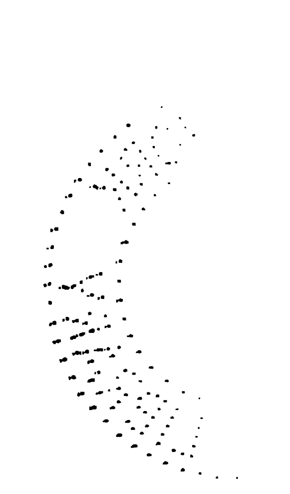
Extrait du GÉNIE CIVIL

PARIS

RAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER
Successeur de BAUDRY et Cie
15, RUE DES SAINTS-PÈRES
MÊME MAISON [...] RUE DE LA RÉGENCE

1904





PRÉFACE

Dans l'une de ces réunions intimes auxquelles le *Génie Civil* convie les membres de son Comité supérieur de rédaction, et où nous signalons les travaux que chacun de nous observe à l'entour de lui, j'ai rappelé les découvertes faites par M. et Mme Curie dans les laboratoires de l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris. J'ai fait connaître les patientes recherches auxquelles nous assistons depuis plusieurs années, et leur importance non seulement au point de vue de la physique et de la chimie, mais encore au point de vue de nos conceptions philosophiques sur la nature de la matière et sur l'énergie.

On m'a demandé, à la suite de cette communication, si je ne pourrais pas obtenir de M. Curie ou de l'un de ses collaborateurs un exposé destiné à mettre les lecteurs du *Génie Civil* au courant de ces remarquables recherches. M. Curie, trop absorbé par ses travaux de laboratoire, a confié à M. Danne le soin de rédiger cette notice qu'il a revue lui-même et dont nous avons eu le plaisir de donner la primeur aux lecteurs du *Génie Civil*.

M. Danne, qui remplit auprès de M. Curie les fonctions de préparateur est un de nos plus brillants élèves; le poste qu'il occupe l'a mis en situation de traiter ce sujet avec une très grande compétence, et d'exposer la genèse de la découverte de M. et Mme Curie, les résultats scientifiques actuellement acquis, ainsi que les conséquences qu'on en peut tirer.

Les publications qui ont été faites depuis l'attribution du prix Nobel rendaient nécessaire une *mise au point* de la question : à lire ces comptes rendus plus ou moins fantaisistes, il est impossible au public de soupçonner la somme de travail, la patience, la hauteur de vues qu'ont exigées ces recherches, et que, depuis des années je constate avec une joie légitime pour notre École et pour la France, en suivant les travaux de notre illustre professeur et de sa femme. Sans doute, depuis ces quatre dernières années, le monde scientifique connaissait l'importance des découvertes qui se poursuivaient rue Lhomond; elles avaient été exposées à plusieurs reprises dans des réunions savantes, mais la modestie de leurs auteurs avait laissé le grand public français dans l'ignorance, et ce n'est que lorqu'il a vu de quelles récompenses elles étaient l'objet, qu'il a compris la grandeur de l'œuvre de nos compatriotes. On sait en effet, que M. et Mme Curie ont été appelés à partager, avec M. H. Becquerel, le prix Nobel pour la Physique, et que M. Curie avait reçu, peu de temps avant, la médaille Davy qui est la plus haute récompense dont dispose la Société royale de Londres. L'Académie des Sciences

avait d'ailleurs reconnu en 1901 et en 1902 l'intérêt des découvertes de M. et Mme Curie en leur attribuant les prix La Caze et Debrousse. Nous sommes fiers de voir aujourd'hui leur mérite reconnu, et le directeur de l'École est heureux de contribuer à mettre en lumière les recherches qu'il a vu s'y développer.

Le travail de M. Danne que nous présentons au public est le résumé de l'*état actuel* de nos connaissances sur les propriétés des sels de radium; seuls y sont mentionnés les faits *définitivement acquis à la Science.*

L'auteur a divisé son exposé en plusieurs chapitres distincts : il présente d'abord l'historique de la découverte, fait connaître ensuite le mode d'extraction et la préparation des sels de radium, en entrant dans des détails précis non publiés jusqu'ici, puis il étudie leurs propriétés caractéristiques, leur rayonnement et les effets qu'il produit, leur action physiologique si intéressante et qui permet de prévoir des résultats de la plus haute importance dans la thérapeutique. Enfin il traite de la radioactivité induite et de sa production, et il termine par l'examen des diverses hypothèses mises en avant pour expliquer les phénomènes constatés qui paraissent en contradiction avec les lois généralement admises de la physique et de la chimie; tous ces faits, on le sait, préoccupent au plus haut point, le monde scientifique entier.

M. Danne a dû entrer, pour certaines parties de son travail, dans des détails un peu ardus, indispensables cependant pour la compréhension de questions aussi déli-

cates; ces détails exposés avec netteté permettront, aux chimistes surtout, de lire avec fruit ces parties techniques. Quant aux parties relatives aux propriétés et aux applications des sels de radium, elles sont d'un intérêt captivant et ne manqueront pas de frapper vivement tous les lecteurs de cette étude.

CHARLES LAUTH,

Directeur de l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris.

LE RADIUM

SA PRÉPARATION ET SES PROPRIÉTÉS

HISTORIQUE

La découverte des phénomènes de la radioactivité se rattache aux recherches poursuivies, depuis la découverte des rayons de Röntgen, sur les effets photographiques des substances phosphorescentes et fluorescentes. La connaissance des propriétés des rayons de Röntgen a, en effet, engagé divers savants à rechercher si la propriété d'émettre des rayons très pénétrants n'était pas intimement liée à la phosphorescence.

En 1896, M. H. Becquerel, en étudiant les rayons émis par les corps phosphorescents, observa que, parmi eux, les sels d'uranium étaient la source de radiations spéciales ayant de grandes analogies avec les rayons de Röntgen et les rayons cathodiques. Cette émission de rayons ne puisant pas son énergie, au moins d'une façon apparente, dans l'absorption préalable de rayons calorifiques, lumineux, ultraviolets, cathodiques ou de Röntgen, on se trouvait là en présence d'un phénomène absolument nouveau, bien différent de la phosphorescence et de la fluorescence, puisque dans ces dernières la matière ne se comporte que comme un transformateur de rayons de courtes longueurs d'onde en rayons de longueurs d'onde plus grandes.

L'uranium métallique et ses composés ont la propriété d'émettre ces rayons d'une façon spontanée et continue.

Ces nouveaux rayons impressionnent les plaques photographiques à l'abri de la lumière; ils peuvent traverser toutes les substances solides, liquides et gazeuses, à condition que l'épaisseur en soit suffi-

samment faible : en traversant les gaz, il les rend faiblement conducteurs de l'électricité.

En 1898, M. Schmidt et Mme Curie trouvèrent, séparément, que le thorium jouit de propriétés analogues. Mme Curie donna le nom de *substances radioactives* aux corps tels que l'uranium et le thorium, et appela *rayons de Becquerel* les rayons qu'elles émettent spontanément. Mme Curie, reprenant les études de M. Becquerel, confirmait en outre l'hypothèse émise quelques années auparavant par ce savant, que la radioactivité des composés d'uranium et de thorium se présente comme une *propriété atomique*. Les phénomènes observés ne dépendent, en effet, que de l'élément uranium ou thorium contenu dans le composé.

Au cours de ses recherches, Mme Curie remarqua que certains composés naturels présentaient une activité tout à fait en désaccord avec les résultats précédents. Ainsi la pechblende (minerai d'oxyde d'uranium) se montrait quatre fois plus active que l'uranium métallique ; la chalcolite (phosphate cristallisé de cuivre et d'uranium) était deux fois plus active que l'uranium.

Or, d'après les considérations énoncées plus haut, accordant à la radioactivité le caractère de propriété atomique, aucune de ces substances n'aurait dû se montrer plus active que l'uranium. D'autre part, une chalcolite préparée artificiellement par la méthode de Debray, au moyen de produits purs, ne possédait qu'une activité normale, deux fois et demie plus faible que celle de l'uranium métallique.

L'excès d'activité mis en évidence dans ces minéraux ne pouvait donc être dû qu'à la présence d'une petite quantité de matière fortement radioactive, différente de l'uranium, du thorium et des corps simples alors connus. On a pu résoudre le problème en faisant l'analyse de la pechblende par voie humide et en mesurant la radioactivité de tous les produits obtenus. Et en 1900, M. et Mme Curie, après un travail long, pénible et coûteux, découvraient deux éléments nouveaux un million de fois plus actifs que l'uranium : le *polonium*, corps voisin du bismuth, et le *radium*, corps voisin du baryum. Depuis, M. Debierne a séparé l'*actinium*, substance radioactive nouvelle, appartenant au groupe des terres rares.

Le radium constitue un *élément nouveau ;* il a été obtenu à l'état de sel pur, et a puissamment contribué au développement de l'étude

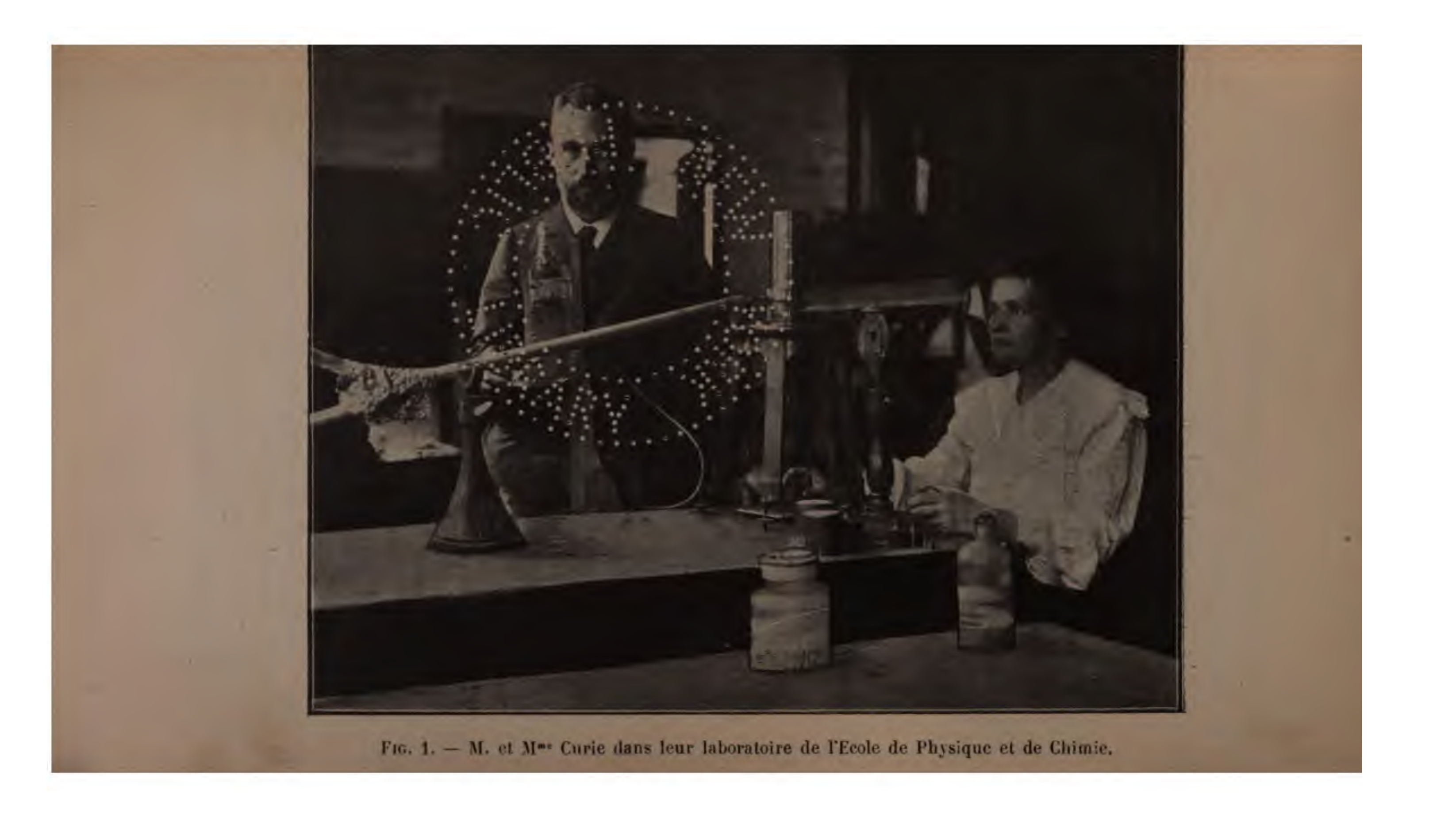
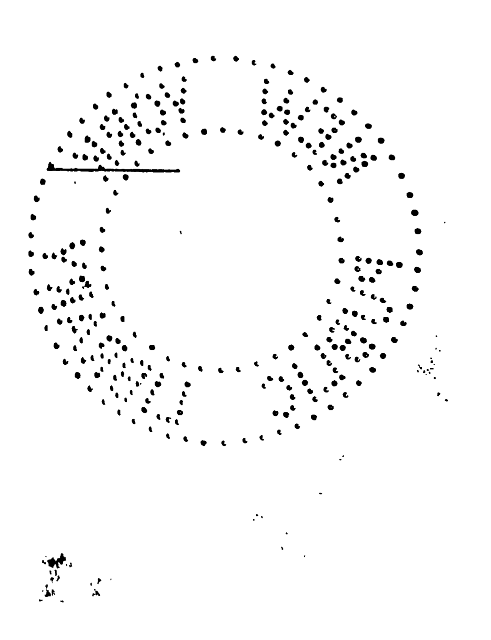


Fig. 1. — M. et Mme Curie dans leur laboratoire de l'Ecole de Physique et de Chimie.

des phénomènes de la radioactivité. C'est lui seul qui fera l'objet de la présente étude.

La découverte du polonium, du radium et les nombreuses recherches effectuées sur ces substances ont été faites par M. et Mme Curie, dans leur laboratoire de l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, grâce à la bienveillante hospitalité accordée à Mme Curie par M. Schützenberger, le regretté directeur de cette école, et par M. Lauth, l'éminent directeur actuel.



CHAPITRE PREMIER

MESURE DE L'INTENSITÉ DU RAYONNEMENT DES SUBSTANCES RADIOACTIVES

Pour étudier la radioactivité des diverses substances radioactives, on peut utiliser soit une méthode photographique, soit une méthode électrique.

1° Méthode photographique.

La méthode photographique, qui a le grand avantage de n'exiger aucun matériel spécial, ne constitue pas à proprement parler une méthode de mesure; les résultats qu'elle fournit ne sont pas comparables entre eux. Cependant elle peut donner, dans certains cas, un moyen précieux d'investigation, et, par exemple, être mise avantageusement à profit dans la recherche des minéraux radioactifs.

Cette application, indiquée par sir W. Crookes, permet de déceler la présence de minéraux radioactifs et de distinguer dans ceux-ci les parties actives des parties inactives.

A cet effet, on use au tour d'optique le minerai à essayer, de façon à former sur celui-ci une surface plane, que l'on applique ensuite sur une plaque photographique, en interposant une feuille mince de papier noir. Après une pose de plusieurs heures dans l'obscurité, la plaque est développée (fig. 2 à 6).

Partout où il y a des substances radioactives, la plaque est impressionnée. La présence de la matière radioactive est indiquée sur la plaque par une petite tache noire; cette tache est d'autant plus noire que la matière est plus active. Il est ensuite facile de comparer entre

elles, au point de vue de leur activité, les diverses parties d'un même minerai.

Cette méthode, d'une application très simple, est particulièrement recommandable pour la recherche des minéraux radioactifs ; elle permet d'examiner rapidement et à peu de frais un très grand nombre d'échantillons.

Une boite parfaitement étanche à la lumière, quelques plaques pho-

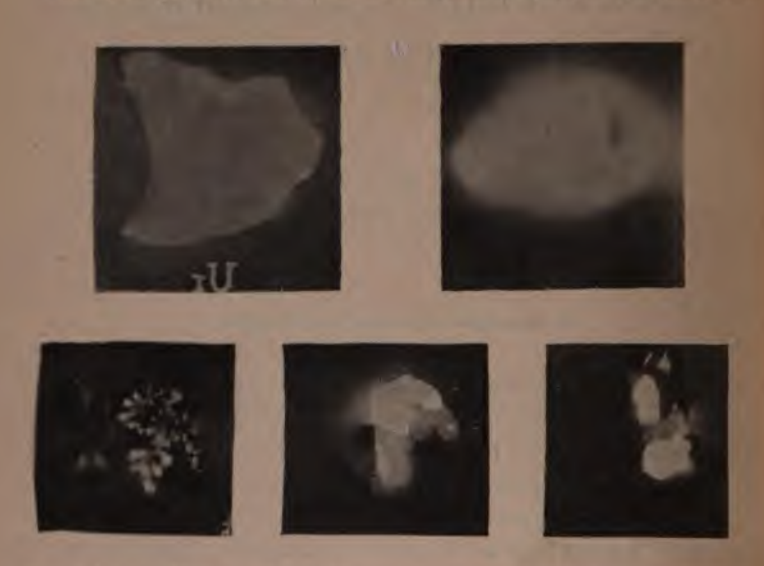


Fig. 2 à 6. — Photographies obtenues au moyen de minéraux radioactifs.

tographiques et le matériel photographique pour le développement constituent le matériel nécessaire pour ce genre de prospection. Avec une plaque photographique 9×12 on peut étudier une vingtaine de minéraux ; des échantillons de 1 centimètre carré de surface suffisent pour y déceler la présence de la radioactivité si elle existe. Les minéraux simplement dégrossis au marteau sont placés sur la plaque sensible après interposition d'une feuille de papier noir mince. Cette feuille est nécessaire afin qu'il ne puisse se produire aucune réaction chimique directe entre la plaque et le minéral à essayer. La durée d'exposition est environ de huit à dix heures.

Dans le cas où la substance essayée n'est pas homogène on étudie chacune des parties séparément. Il est quelquefois avantageux de connaître l'activité moyenne de l'échantillon ; à cet effet, on pulvérise la matière et on étudie la poudre comme précédemment.

2° Méthode électrique.

a. Au moyen de l'électroscope.

La méthode électrique constitue une véritable méthode de mesure. Elle consiste à déterminer la conductibilité acquise par l'air sous l'action des substances radioactives. Cette détermination peut s'effectuer

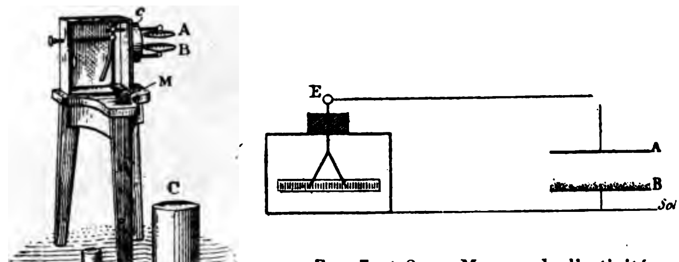


Fig. 7 et 8. — Mesure de l'activité des substances radioactives, par l'électroscope.

d'une façon très simple en observant la vitesse de décharge d'un électroscope chargé. On utilise, à cet effet, le dispositif représenté par les figures 7 et 8.

Les deux plateaux A et B d'un condensateur sont reliés, l'un au sol, l'autre à un électroscope à feuilles d'or chargé d'électricité.

Dans les conditions ordinaires, l'air compris entre les plateaux est isolant, et l'électroscope reste chargé ; mais si l'on place sur le plateau B la matière active finement pulvérisée, la charge de l'électroscope s'écoule au sol, et cela d'autant plus rapidement que la matière est plus active. Il suffit de mesurer la vitesse de chute des feuilles d'or pour avoir une valeur de l'activité de la substance : plus la vitesse de chute est grande, plus la substance est active. La détermination de la vitesse de chute des feuilles d'or se fait d'une façon très simple en

observant, en fonction du temps, les déplacements de l'une des feuilles d'or au moyen d'un microscope M. Pendant l'expérience, on entoure les plateaux A et B du couvercle C qui se fixe sur la rondelle *c* (fig. 7).

Cette méthode, d'une application très aisée, donne des résultats assez peu précis. Pour des mesures plus délicates, il est préférable de lui substituer une méthode électrométrique infiniment plus sensible.

b. Au moyen de l'électromètre.

Le dispositif employé à cet effet se compose, comme dans l'appareil précédent, d'un condensateur formé de deux plateaux A et B (fig. 9).

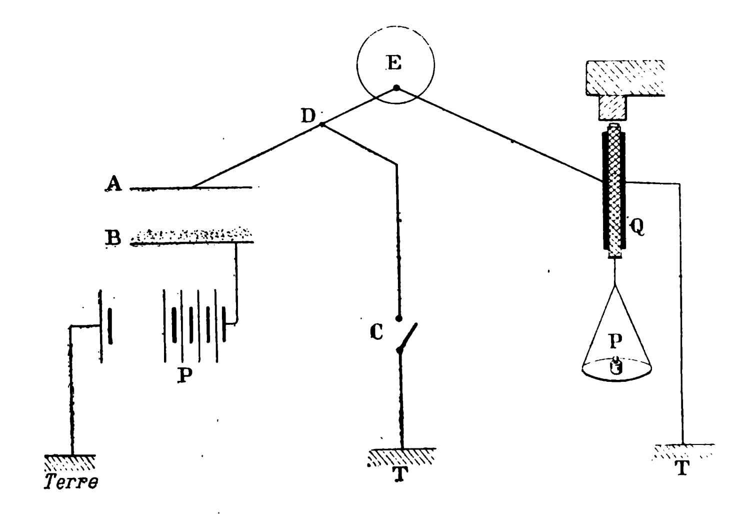


Fig. 9. — Dispositif employé dans la méthode électrométrique.

L'un des plateaux B est porté à un potentiel élevé en le reliant à l'un des pôles d'une batterie d'accumulateurs P d'un grand nombre d'éléments, dont l'autre pôle est à terre. L'autre plateau A est maintenu au potentiel de la terre par le fil CD. Quand on place sur le plateau B une substance radioactive, un courant électrique s'établit entre les deux plateaux.

Le potentiel du plateau A est indiqué par un électromètre E. Si l'on

interrompt en C la communication avec la terre, le plateau A se charge, et cette charge fait dévier l'électromètre. La vitesse de la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant, et peut servir à la mesurer. Mais il est préférable d'effectuer cette mesure en compensant la charge que prend le plateau A, de manière à maintenir l'électromètre au zéro. Les charges dont il est question ici sont extrêmement faibles; elles peuvent être compensées au moyen d'un quartz piézo-électrique Q.

Le quartz piézo-électrique, réalisé par MM. J. et P. Curie, constitue un étalon de quantité d'électricité parfaitement constant. L'appareil est basé sur le principe suivant : si l'on exerce sur un cristal de quartz une traction à la fois normale à l'axe optique et à l'axe binaire, le cristal se polarise électriquement dans le sens de l'axe binaire, et les deux faces qui lui sont normales semblent chargées de deux couches d'électricité de nom contraire. En recouvrant ces deux faces de feuilles d'étain, on forme un condensateur qui se charge d'électricité quand on exerce la traction; si, après avoir déchargé les feuilles d'étain, on fait ensuite cesser la traction, le condensateur se charge de nouveau, mais cette fois, les charges sur chaque face sont égales et de signe contraire à celles obtenues dans la première expérience.

L'appareil est formé d'une lame de quartz longue et mince, convenablement taillée et mastiquée à ses deux extrémités, en H et B (fig. 10 et 11), dans des pièces métalliques. Ces pièces servent à transmettre une traction exercée à l'aide de poids placés dans un plateau. L'extrémité H est suspendue à un crochet fixe. A l'extrémité inférieure B vient s'accrocher une tige qui transmet l'effort de traction. Les faces opposées de la lame de quartz sont recouvertes de feuilles d'étain isolées, telles que *mn*, *m'n'*, sur lesquelles se dégage l'électricité. Deux petits ressorts légers *r* et *r'* mettent ces feuilles d'étain en communication avec les appareils électriques.

La quantité d'électricité dégagée par la lame de quartz est proportionnelle au poids tenseur.

Pour compenser le courant produit dans le condensateur, on soumet la lame de quartz à une tension connue, produite par un poids placé dans le plateau P (fig. 9). On supprime en C la communication du plateau A avec la terre et l'on soulève peu à peu, à la main, le poids

du plateau P. Cette opération fait dégager progressivement une quantité connue d'électricité pendant un temps qu'on mesure.

L'opération peut être réglée de telle manière qu'il y ait, à chaque instant, compensation entre la quantité d'électricité qui traverse le condensateur et celle de signe contraire que fournit le quartz. On peut ainsi mesurer en valeur absolue la quantité d'électricité qui traverse le condensateur pendant un temps donné, c'est-à-dire l'intensité du courant. La mesure effectuée dans ces conditions est indépendante de la sensibilité de l'électromètre. Cette méthode est extrêmement sensible; on peut, par exemple, déceler la radioactivité d'un produit, quand elle n'est que $^1/_{100}$ de celle de l'uranium métallique.

Cependant l'activité que l'on peut mesurer par cette méthode est assez limitée; il se peut, en effet, que le quartz ne puisse plus fournir dans un temps convenable une quantité d'électricité suffisante. On tourne alors la difficulté en faisant varier la surface de la matière active placée dans le condensateur. Plus la surface est grande, plus le courant qui traverse le condensateur est intense. On détermine, une fois pour toutes, pour chacune des surfaces employées, la valeur relative des courants mesurés, en les ramenant tous à une même surface. Cette opération se fait très simplement en mesurant les courants obtenus avec un même produit pour différentes surfaces.

Pour des produits très actifs, on est obligé d'employer des surfaces très petites; il en résulte une erreur notable dans la mesure, car il est difficile d'obtenir une surface bien définie. On préfère employer, dans ce cas, un dispositif légèrement différent, qui consiste à placer le produit au-dessous du condensateur, à une distance plus ou moins grande de celui-ci, suivant l'activité de la substance à mesurer. Le rayonnement qui traverse les plateaux du condensateur peut être ainsi considérablement diminué.

On pourrait aussi mesurer le courant à l'aide d'un galvanomètre sensible. Cette méthode est assez longue et délicate à employer; il faut, en effet, vérifier après chaque mesure la sensibilité du galvanomètre.

Si, pour un même condensateur et une même substance radioactive placée entre les deux plateaux, on fait varier la différence de potentiel entre les deux armatures, on constate que le courant mesuré augmente avec la différence de potentiel. Cependant, pour de fortes dif-

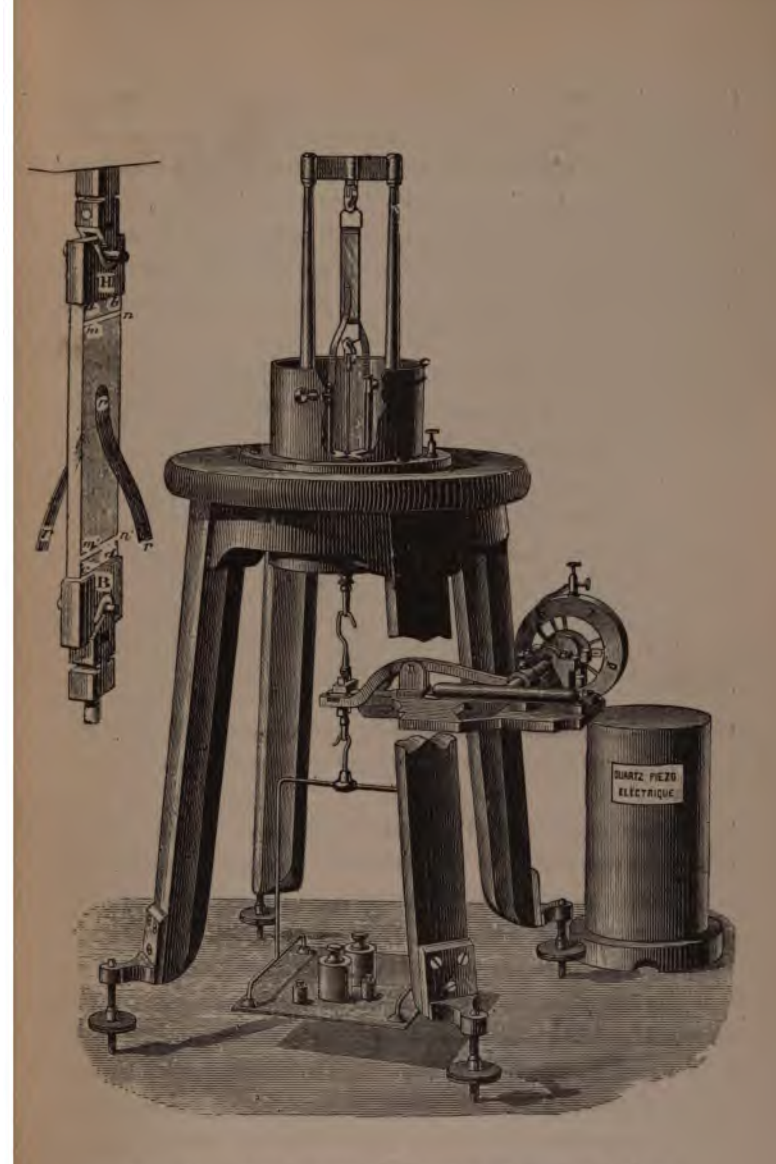


FIG. 10 et 11. — Quartz piézo-électrique de MM. J. et P. Curie.

férences de potentiel, le courant tend vers une valeur limite qui est sensiblement constante. C'est ce courant limite que l'on prend comme mesure de la radioactivité. L'ordre de grandeur des courants limites que l'on obtient avec les composés d'urane est de 10^{-11} ampères pour un condensateur dont les plateaux ont 8 centimètres de diamètre et sont distants de 3 centimètres. C'est l'intensité prise pour unité dans e diagramme de la figure 12. Si l'on adopte comme unité d'activité

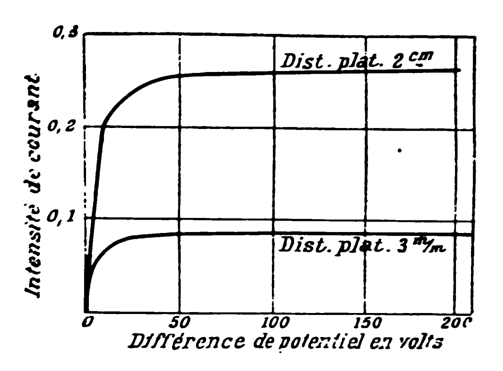


Fig. 12. — Diagramme des intensités du courant en fonction des différences de potentiel entre les plateaux du condensateur.

le courant obtenu avec l'uranium métallique, l'activité des autres substances sera exprimée en fonction de l'activité de l'uranium.

C'est cette méthode que M. et Mme Curie ont appliquée dès le début de leurs recherches, dans les essais de concentration des produits actifs. Ils mesuraient la radioactivité d'un produit et effectuaient sur ce dernier une séparation chimique. Ils mesuraient ensuite la radioactivité de tous les produits obtenus et constataient ainsi comment et en quelles proportions la substance radioactive était répartie entre les diverses parties séparées. M. et Mme Curie obtenaient ainsi des indications en partie comparables avec celles qu'aurait fournies l'analyse spectrale.

Cette méthode de recherches avait, dans le cas de la radioactivité, le grand avantage d'être considérablement plus sensible que la méthode spectrale.

CHAPITRE II

EXTRACTION DES SELS DE RADIUM

Minerais.

Le radium se trouve à l'état de traces dans un certain nombre de minéraux, tels que la pechblende et la carnotite. Il accompagne l'uranium et le baryum dans ces minéraux, mais jamais on ne le trouve dans les minéraux de baryum ne contenant pas d'uranium.

M. et M[me] Curie ont tenu à élucider ce dernier fait expérimental, en s'assurant que le chlorure de baryum du commerce ne contient pas de chlorure de radium. A cet effet, ils ont entrepris le fractionnement d'une grande quantité de chlorure de baryum du commerce, par la méthode que nous étudierons plus loin, espérant concentrer par ce procédé la trace de chlorure de radium qui pouvait s'y trouver. Le produit obtenu n'a montré aucune radioactivité; il ne contenait donc pas de radium. Ce corps est, par suite, absent des minerais qui fournissent le baryum du commerce.

En Europe, c'est de la pechblende de Joachimsthal, en Bohême, que l'on a retiré jusqu'à ce jour le radium. Cette pechblende est environ deux à trois fois plus active que l'uranium métallique et permet d'obtenir 1 à 2 décigrammes de bromure de radium par tonne de minerai traité.

La complexité de la matière première, jointe à sa très faible teneur en radium, a rendu ces recherches extrêmement pénibles.

La pechblende est un minerai d'oxyde d'uranium accompagné d'un grand nombre d'autres métaux, tels que le fer, l'aluminium, le calcium, le plomb, le bismuth, le cuivre, l'arsenic, l'antimoine et des matières radioactives nouvelles, le polonium, le radium, et l'actinium.

D'après les expériences récentes de MM. Elster et Geitel, on peut admettre que les substances radioactives se trouvent répandues d'une manière prèsque uniforme à la surface de la terre. Un très grand

nombre de corps doivent en contenir, mais, toutefois, en très faible quantité.

MM. Elster et Geitel sont parvenus à retirer de matières argileuses très peu actives des produits dont l'activité était comparable à celle de l'uranium.

Traitement de la pechblende.

Le traitement de la pechblende se divise en trois phases bien distinctes.

Dans une première phase, la pechblende est d'abord débarrassée de tout l'uranium qu'elle contient. Jusqu'à ce jour, cette opération s'est effectuée sur le lieu même d'extraction du minerai.

Les résidus de cette opération contiennent les substances fortement radioactives. Un nouveau traitement, réalisé à l'usine, a pour but de séparer et de purifier les portions riches en radium, polonium et actinium. Cette nouvelle opération constitue la deuxième phase du traitement. Chacune des portions est ensuite traitée séparément, en vue d'obtenir la substance radioactive qu'elle contient.

La portion qui renferme le radium est environ soixante fois plus active que l'uranium ; on en retire le radium par une série de fractionnements effectués sur le bromure de baryum radifère. Ces fractionnements, réalisés au laboratoire, forment la troisième et dernière phase du traitement.

Nous allons examiner avec un peu plus de détails les diverses parties de ce traitement.

1° Séparation de l'uranium contenu dans la pechblende.

Le minerai, concassé et broyé, est grillé avec du carbonate de soude. La matière résultant de ce traitement est lessivée d'abord à l'eau chaude pour enlever les sels de soude solubles, puis à l'acide sulfurique étendu. Cette dernière solution contient tout l'uranium. Le résidu insoluble, autrefois sans valeur, est aujourd'hui recueilli avec soin ; il contient les substances fortement radioactives. Il a une activité quatre à cinq fois plus grande que celle de l'uranium.

2° Traitement des résidus.

Ce résidu renferme principalement des sulfates de plomb et de calcium, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer. On y trouve, en outre, en quantité plus ou moins grande, presque tous les métaux (cuivre, bismuth, zinc, cobalt, manganèse, nickel, vanadium, antimoine, thallium, terres rares, niobium, tantale, arsenic, baryum, etc.). Le radium se trouve disséminé dans ce mélange à l'état de sulfate et en constitue le sulfate le moins soluble.

La première opération, effectuée sur ces résidus, consiste à les traiter par de l'acide chlorhydrique concentré. La matière est fortement désagrégée et passe en partie dans la solution. De cette dissolution on peut tirer le polonium et l'actinium; le premier est précipité par l'hydrogène sulfuré; le second se trouve dans les hydrates précipités par l'ammoniaque, dans la dissolution séparée des sulfures et peroxydée. Quant au radium, il reste dans la portion insoluble qui est lavée à l'eau, puis traitée par une dissolution concentrée et bouillante de carbonate de soude, opération qui a pour but de transformer en carbonates, les sulfates non attaqués dans la réaction précédente. On lave alors la matière très complètement, à l'eau, puis on l'attaque par l'acide chlorhydrique étendu, exempt d'acide sulfurique. La dissolution contient le radium avec un peu de polonium et d'actinium. On la filtre et on la précipite par l'acide sulfurique. On obtient ainsi des sulfates bruts de baryum radifère contenant également de la chaux, du plomb, du fer, et ayant aussi entraîné un peu d'actinium.

Une tonne de résidu fournit environ 10 à 20 kilogr. de sulfates bruts, dont l'activité est trente à soixante fois plus grande que celle de l'uranium métallique.

On procède alors à la purification de ces sulfates. Pour cela, on les fait bouillir avec une solution concentrée de carbonate de soude et on transforme les carbonates obtenus en chlorures. La dissolution, traitée par l'hydrogène sulfuré, donne un léger précipité de sulfures actifs contenant du polonium. On filtre, on peroxyde par le chlorate de potassium et on précipite par de l'ammoniaque pure.

Les oxydes et les hydrates précipités sont très actifs; ils contiennent

encore un peu d'actinium. La dissolution filtrée est précipitée par le carbonate de soude. Les carbonates alcalino-terreux précipités sont lavés et transformés èn chlorures. Ces chlorures sont évaporés à sec et lavés avec de l'acide chlorhydrique concentré et pur. Le chlorure de calcium se dissout presque complètement, alors que le chlorure de baryum radifère reste insoluble. La solution surnageante contient, par conséquent, la chaux et peut entraîner un peu de radium. On la précipite par l'acide sulfurique. Il se dépose peu à peu un sulfate très actif que l'on fait entrer dans un nouveau traitement. Quant au chlorure de baryum radifère insoluble dans l'acide chlorhydrique concentré, il est repris par l'eau. La solution est de nouveau précipitée par le carbonate de soude. Les carbonates alcalino-terreux, lavés, sont traités cette fois par l'acide bromhydrique, dans le but de les transformer en bromures.

Après cette longue série d'opérations, on obtient, par tonne de matière première traitée, 8 à 10 kilogr. de bromure de baryum radifère, dont l'activité est environ soixante fois plus grande que celle de l'uranium métallique. Ce bromure est alors prêt pour le fractionnement.

3° Fractionnement des sels de baryum radifères.

Le fractionnement a pour but d'obtenir des bromures de baryum radifères de plus en plus riches en radium. Le procédé consiste à soumettre le mélange des bromures à une série de cristallisations dans l'eau pure d'abord, puis dans l'eau additionnée d'acide bromhydrique. On utilise la différence des solubilités des deux bromures, celui de radium étant moins soluble que celui de baryum.

Au début de leurs recherches sur la séparation du radium, M. et Mme Curie effectuaient les fractionnements sur les chlorures. M. Giesel a reconnu que la séparation du baryum et du radium, par cristallisations fractionnées des bromures, était beaucoup plus avantageuse, surtout au début du fractionnement.

Les bromures sont dissous dans l'eau distillée et la dissolution amenée à saturation à la température de l'ébullition. On la laisse ensuite cristalliser par refroidissement dans une capsule couverte. On obtient ainsi au fond de la capsule de beaux cristaux, que l'on sépare

de la liqueur surnageante par décantation. Ces cristaux sont environ cinq fois plus actifs que le bromure en solution.

On a ainsi partagé le sel en deux portions sur lesquelles on répète identiquement la même opération. La dissolution des bromures est évaporée et amenée à saturation à chaud; les sels sont redissous, puis de nouveau mis à cristalliser.

Quand les cristallisations sont terminées, on se trouve en présence de quatre portions nouvelles. La solution surnageante de la partie la plus active (cristaux) est réunie avec les cristaux de la partie la moins active (solution), ces deux matières ayant sensiblement la même activité. On se trouve avoir alors trois portions qui sont soumises à un traitement analogue. Le fractionnement se poursuit ainsi, toujours par la même méthode. Après chaque série d'opérations, la solution saturée, provenant d'une portion, est versée sur les cristaux provenant de la portion suivante. Il s'ensuit que les produits de plus en plus actifs et les produits de moins en moins actifs suivent une marche en sens inverse.

Cependant on ne laisse pas croître indéfiniment le nombre des portions. Quand les produits appauvris (queue du fractionnement) n'ont plus qu'une activité insignifiante, on les élimine. Il en est de même pour les portions enrichies (tête du fractionnement) quand le nombre de portions que l'on désire a été obtenu. On opère alors avec un nombre constant de portions. On élimine progressivement et au fur et à mesure que le nombre des fractionnements augmente, d'une part, des produits très peu actifs, de l'autre, des produits très riches en radium.

La faible quantité de produit dont on dispose aujourd'hui n'a pas permis d'étudier d'une façon bien complète les propriétés chimiques des sels de radium. Cette étude pourrait, sans doute, conduire à quelques modifications intéressantes au point de vue de la rapidité de la préparation de ce corps.

On a obtenu un certain nombre de sels, le bromure, le chlorure l'azotate, mais on n'a pas encore préparé le radium à l'état métallique. Il serait cependant facile de réaliser cette préparation, qui présente peu d'intérêt, par la méthode que Bunsen a employée pour la préparation du baryum.

CHAPITRE III

CARACTÈRES DES SELS DE RADIUM

Caractères chimiques.

Le bromure de radium ainsi obtenu a une activité environ un million de fois plus grande que l'uranium métallique. Tous les sels de radium : bromure, chlorure, azotate, carbonate, sulfate, ont le même aspect que ceux de baryum, quand ils viennent d'être préparés à l'état solide ; ils sont alors blancs. Cependant, ils se colorent progressivement avec le temps en jaune et même en violet.

Au point de vue chimique, tous les sels de radium ont des propriétés absolument comparables aux sels correspondants de baryum. Cependant, le chlorure et le bromure de radium sont moins solubles que le chlorure et le bromure de baryum. C'est cette propriété importante que l'on a utilisée dans la séparation du radium et du baryum.

M. Giesel a constaté que le chlorure de radium, à l'état solide ou en solution, produit d'une façon continue de l'hydrogène. De plus, un chlorure de radium, qui a été enfermé pendant quelque temps dans une ampoule, dégage, lorsqu'on brise l'ampoule, une forte odeur de chlore.

Coloration de la flamme et spectre.

Les sels de radium communiquent à la flamme une superbe teinte carmin.

Dès le début des recherches de M. et Mme Curie sur les substances radioactives, le regretté M. Demarçay avait bien voulu se charger de

l'examen spectroscopique de ces substances. Le concours d'un spectroscopiste aussi distingué est venu apporter un contrôle important à l'hypothèse de l'existence d'éléments nouveaux radioactifs. L'analyse spectrale a, dans le cas du radium, confirmé d'une façon complète cette hypothèse.

L'étude du spectre a été reprise depuis par MM. Runge et Precht, et Crookes.

Le spectre du radium est bien caractéristique ; son aspect général est celui des métaux alcalino-terreux, c'est-à-dire que l'on y trouve des raies fortes avec quelques bandes nébuleuses.

Avec l'étincelle et une solution de chlorure de radium pur, M. Demarçay a obtenu un spectre dont toutes les raies sont nettes et étroites. Les trois principales raies sont, l'une dans le bleu ($\lambda = 468{,}30$), les deux autres, dans le violet ($\lambda = 434{,}06$) et l'ultra-violet ($\lambda = 381{,}47$). Ces trois raies sont fortes et atteignent l'égalité avec les raies les plus intenses actuellement connues. On aperçoit également dans le spectre deux bandes nébuleuses fortes : l'une est dans le bleu, l'autre commence dans le bleu indigo et est dégradée vers l'ultra-violet.

D'après M. Demarçay, le radium peut figurer parmi les corps ayant la réaction spectrale la plus sensible. On commence à apercevoir la principale raie du radium ($\lambda = 381{,}47$) avec des matières cinquante fois plus actives que l'uranium. Cependant, la sensibilité de la méthode spectroscopique n'est en rien comparable avec la sensibilité de la méthode électrique précédemment décrite ; celle-ci permet, en effet, de déceler la présence d'une substance radioactive alors même que son activité n'atteint que le $^1/_{100}$ de celle de l'uranium.

Le spectre de flamme des sels de radium, examiné par M. Giesel, contient deux belles bandes rouges, une raie dans le bleu vert et deux lignes faibles dans le violet. Ce spectre est très brillant.

Poids atomique.

Le poids atomique du radium a été déterminé par Mme Curie ; il est égal à 225.

Pour effectuer cette détermination, Mme Curie a employé la méthode classique, qui consiste à doser, à l'état de chlorure d'argent, le chlore

contenu dans un poids connu de chlorure de radium anhydre. Le chlorure employé dans les dernières mesures a été soigneusement purifié et complètement débarrassé du baryum qui l'accompagnait, en répétant un très grand nombre de fois les fractionnements. Examiné par M. Demarçay au spectroscope, il ne contient, d'après lui, que des traces infinitésimales de baryum, incapables d'influencer d'une façon appréciable le poids atomique.

Le radium constitue un élément nouveau du groupe des métaux alcalino-terreux. Il est dans cette série l'homologue supérieur du baryum.

D'après son poids atomique, le radium vient se placer également dans le tableau de Mendéléeff à la suite du baryum, dans la colonne des métaux alcalino-terreux et sur la rangée qui contient déjà l'uranium et le thorium.

Luminosité des sels de radium.

Tous les sels de radium sont lumineux dans l'obscurité. Cette luminosité est particulièrement intense avec le chlorure et le bromure de radium, quand le produit vient d'être chauffé; elle diminue dès que le sel reprend de l'humidité. Les chlorure et bromure de radium, étant très hygrométriques, doivent être placés dans des tubes scellés, pour conserver l'éclat qu'ils ont acquis après le chauffage. La lumière émise par les sels de radium rappelle comme teinte celle du ver luisant (lampyre); elle peut avoir assez de force pour être vue en plein jour.

Dégagement de chaleur des sels de radium.

Les sels de radium sont le siège d'un dégagement spontané et continu de chaleur. Un gramme de bromure de radium, préparé depuis plusieurs mois, dégage en moyenne 100 petites calories par heure; c'est dire qu'en une heure un gramme de radium peut fondre un peu plus que son poids de glace.

Ce dégagement de chaleur est assez fort pour qu'on puisse le mettre

en évidence même par une expérience grossière, faite avec un thermomètre.

Un thermomètre *t* et une ampoule *a* contenant 7 décigrammes de bromure de radium, par exemple, sont placés dans un vase à isolement calorifique A (fig. 13 et 14).

Quand l'équilibre thermique est établi, le thermomètre *t* indique

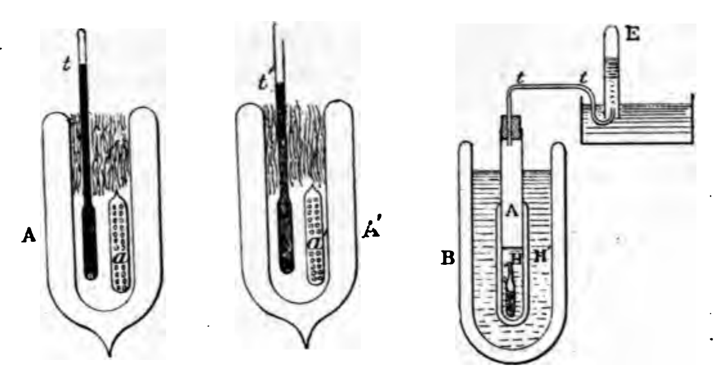


FIG. 13 et 14. — Dégagement de chaleur des sels de radium.

FIG. 15. Ébullition de l'hydrogène liquéfié, produite par les sels de radium.

constamment un excès de température de 3 degrés sur les indications d'un autre thermomètre *t'* placé dans les mêmes conditions, mais avec une ampoule contenant un sel inactif, du chlorure de baryum par exemple.

La quantité de chaleur dégagée est évaluée, à l'aide du calorimètre de Bunsen, en plaçant dans le calorimètre une ampoule de verre qui contient le sel de radium; on constate un apport continu de chaleur, qui s'arrête dès que l'on éloigne le radium. On peut également employer l'appareil représenté par la figure 15 dans lequel on utilise la chaleur produite par le radium pour faire bouillir un gaz liquéfié. Cette expérience réussit particulièrement bien avec l'hydrogène liquide :

Un tube A (fermé à la partie inférieure et entouré d'un isolateur thermique à vide) contient un peu d'hydrogène liquide H; un tube de dégagement *t* permet de recueillir le gaz dans une éprouvette graduée E remplie d'eau. Le tube A et son isolateur plongent tous deux

dans un bain d'hydrogène liquide H'. Dans ces conditions, aucun dégagement gazeux ne se produit dans le tube A ; mais si l'on introduit dans l'hydrogène du tube A une ampoule contenant du sel de radium, il se fait un dégagement continu de gaz hydrogène que l'on recueille en E.

Sept décigrammes de bromure de radium font dégager environ 70 centimètres cubes de gaz par minute.

Un sel de radium qui vient d'être préparé dégage une quantité de chaleur relativement faible. La chaleur dégagée en un temps donné augmente ensuite continuellement et tend vers une valeur déterminée qui n'est pas encore tout à fait atteinte au bout d'un mois.

Quand on dissout dans l'eau un sel de radium et que l'on enferme la solution dans un tube scellé, la quantité de chaleur dégagée par la solution est d'abord faible; elle augmente ensuite et tend à devenir constante au bout d'un mois. Quand l'état limite est atteint, le sel de radium enfermé en tube scellé dégage la même quantité de chaleur à l'état solide et à l'état de dissolution.

Variations d'activité des sels de radium.

Les sels de radium maintenus dans un même état physique possèdent une activité permanente qui ne présente pas de différences appréciables, même au bout de plusieurs années.

Cependant, quand on vient de préparer un sel de radium à l'état solide, il n'a pas tout d'abord une activité constante; celle-ci va en augmentant avec le temps et atteint une valeur limite sensiblement invariable au bout d'un mois environ. L'activité limite est quatre à cinq fois plus grande que l'activité initiale.

Le phénomène inverse se produit quand on dissout un sel de radium dans l'eau. L'activité de la solution est d'abord très grande, puis, si la solution est abandonnée à l'air libre, elle perd rapidement une partie de son activité et prend finalement une activité limite qui peut être considérablement plus faible que celle du produit initial.

Lorsqu'on chauffe un sel de radium, son activité diminue, mais cette diminution ne persiste pas quand on ramène le sel à la température ambiante. Le sel reprend peu à peu son activité primitive.

Rayonnement et radioactivité induite produits par les sels de radium.

Les sels de radium émettent d'une façon spontanée et continue un rayonnement spécial capable de provoquer des phénomènes d'une intensité remarquable.

Ils peuvent enfin communiquer leurs propriétés à tous les corps placés dans leur voisinage. Ce phénomène constitue le phénomène de la *radioactivité induite.*

Ces deux dernières propriétés sont d'une importance considérable, tant au point de vue des phénomènes eux-mêmes, que des effets qu'ils peuvent engendrer. Elles méritent qu'on leur consacre une très large place dans l'étude des phénomènes produits par les sels de radium.

CHAPITRE IV

LE RAYONNEMENT DES SELS DE RADIUM

Séparation des différents groupes de rayons.

Les rayons émis par les sels de radium se propagent en ligne droite; ils ne sont ni réfléchis, ni réfractés, ni polarisés. Ils forment un mélange complexe que l'on peut diviser en trois groupes principaux. M. Rutherford a désigné par α, β, γ ces différents groupes (fig. 16).

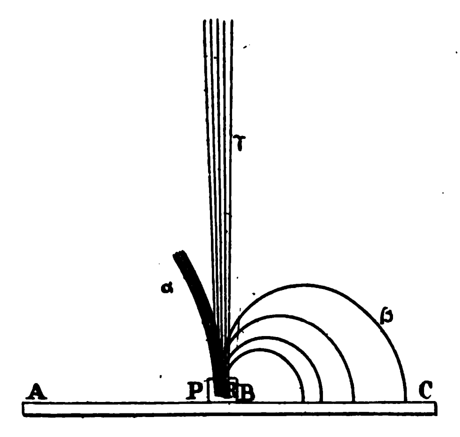


Fig. 16. — Action du champ magnétique sur les sels de radium.

L'action d'un champ magnétique intense et la facilité plus ou moins grande avec lesquelles ils peuvent traverser les différentes substances permettent de les distinguer.

Imaginons que l'on place une petite quantité d'un sel de radium au fond d'une cavité profonde creusée dans un bloc de plomb P (fig. 16). Le rayonnement s'échappe alors sous forme d'un pinceau rectiligne.

Disposons cette petite cuve dans un champ magnétique uniforme et très intense, produit par un électro-aimant puissant (fig. 17) placé de telle façon que son pôle nord soit en avant du plan de la figure et son pôle sud derrière la petite cuve. Dans ces conditions, les trois groupes de rayons α, β, γ sont séparés.

Les rayons α sont très légèrement déviés vers la gauche de leur trajectoire rectiligne, même par les champs les plus intenses. Ils forment la partie la plus importante du rayonnement du radium du

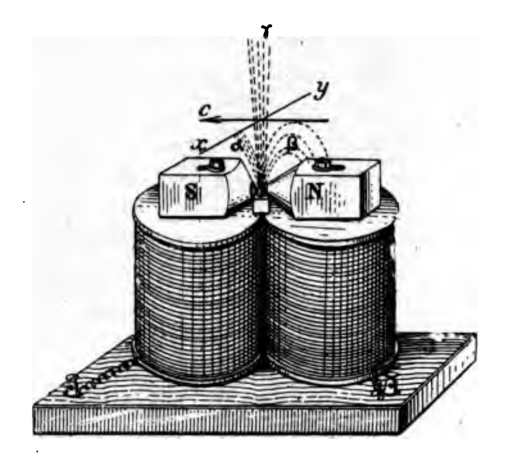


Fig. 17. — Action du champ magnétique sur les sels de radium.

moins si l'on convient de mesurer le rayonnement par la grandeur de la conductibilité qu'ils communiquent à l'air.

Les rayons β sont très fortement déviés par le champ magnétique, et cela de la même manière et dans le même sens que les rayons cathodiques.

Enfin, les rayons γ ne sont pas déviés du tout de leur trajectoire rectiligne; ils sont analogues aux rayons de Röntgen et ne forment qu'une faible partie du rayonnement.

Examinons rapidement la constitution de ces divers groupes de rayons.

Les rayons α du radium sont très peu pénétrants. Ils sont très rapidement absorbés par l'air, à leur sortie des sels de radium; une lame

d'aluminium de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur les arrête complètement.

Les lois de l'absorption de ces rayons par les écrans permettent, indépendamment de l'action du champ magnétique, de les distinguer nettement des rayons de Röntgen. En effet, en traversant des écrans successifs, les rayons α deviennent de moins en moins pénétrants (le phénomène inverse se produit pour les rayons de Röntgen). Pour expliquer ce résultat, on est déjà conduit à supposer que ces rayons sont formés de projectiles dont l'énergie diminue pendant la traversée de chaque écran. On constate aussi qu'un écran donné absorbe beaucoup plus fortement les rayons α quand il est placé loin du sel de radium que quand il en est placé tout près.

Rayons α.

Les rayons α sont très peu déviés par les champs électrique et magnétique les plus intenses; on les avait même primitivement considérés comme étant des rayons non déviables sous cette action. Par un dispositif très ingénieux, M. Rutherford est parvenu à démontrer et à mesurer la déviation de ces rayons dans le champ magnétique.

Il résulte de ces recherches que les rayons α se comportent comme des projectiles animés d'une grande vitesse et *chargés d'électricité positive*. Ils sont analogues aux *rayons canaux* (canalstrahlen) de M. Goldstein.

D'après les dernières mesures de M. Des Coudres, la vitesse de ces projectiles est *20 fois plus faible* que celle de la lumière. Si l'on admet que la charge électrique d'un de ces projectiles est la même que celle d'un atome d'hydrogène dans l'électrolyse, on trouve que sa masse est de l'ordre de grandeur de celle d'un *atome d'hydrogène*.

Les rayons α forment un groupe qui semble homogène; ils sont tous déviés de même façon par le champ magnétique.

Ce sont eux qui agissent dans le petit appareil réalisé par M. Crookes sous le nom de *spinthariscope*. Dans cet appareil on a disposé à l'extrémité d'un fil métallique *a* (fig. 18) une fraction de milligramme d'un sel de radium. On place ce fragment à quelques dixièmes de millimètre d'un écran E au sulfure de zinc de Sidot. En examinant

dans l'obscurité, avec une forte loupe L, l'écran qui est tourné vers le radium, on aperçoit des petits points lumineux sur l'écran. Ces points lumineux apparaissent et disparaissent continuellement ; ils font songer à un ciel chargé d'étoiles scintillantes. L'effet est très curieux. On

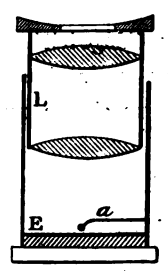


FIG. 18. — Spinthariscope de Crookes.

peut imaginer que chaque point lumineux qui apparaît et disparaît résulte du choc d'un projectile. On aurait affaire pour la première fois à un phénomène permettant de distinguer l'action individuelle d'un atome.

Rayons β.

Les rayons β du radium sont analogues aux rayons cathodiques ; ils sont facilement déviés par un champ magnétique et de la même façon que ces derniers.

On peut mettre en évidence la déviation des rayons β par le champ magnétique au moyen de l'expérience suivante : une ampoule en verre renfermant un sel de radium R est placée à l'une des extrémités d'un tube en plomb à parois très épaisses AB (fig. 19). Ce tube est placé entre les branches d'un électro-aimant et est orienté normalement à la ligne des pôles NS. A une certaine distance de l'extrémité B du tube de plomb, on a disposé un électroscope E chargé d'électricité.

Les rayons émis par le sel de radium et qui sont canalisés par le tube provoquent la décharge de l'électroscope. Si l'on fait passer le courant dans le fil de l'électro-aimant, les rayons β sont rejetés sur les parois du tube de plomb, les rayons γ seuls agissent et la dé-

charge se fait très lentement. Quant aux rayons α, ils sont absorbés par l'air immédiatement au voisinage du sel de radium et ne peuvent parvenir jusqu'à l'électroscope. Si l'on cesse de faire passer le courant dans l'électro-aimant, les rayons β provoquent rapidement la décharge de l'électroscope.

Les rayons β forment un mélange hétérogène; on peut les distinguer les uns des autres par leur pouvoir pénétrant et par la déviation variable qu'ils éprouvent dans un champ magnétique. Certains d'entre

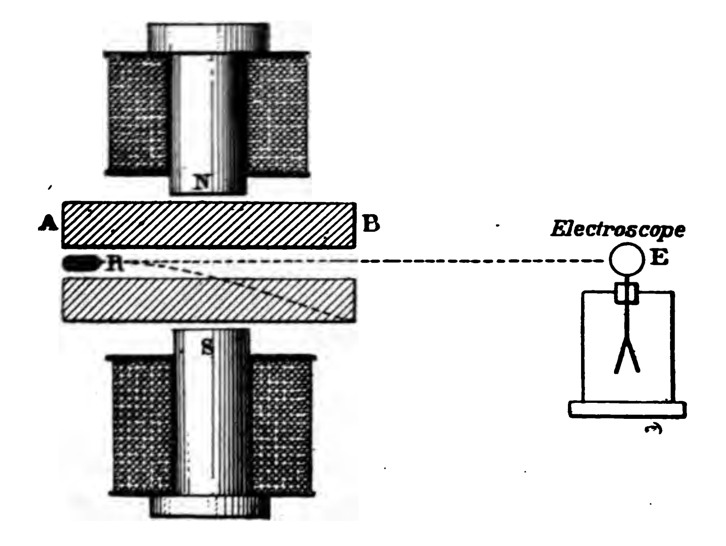


Fig. 19. — Déviation des rayons β par le champ magnétique.

eux sont facilement absorbés par une lame d'aluminium de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, tandis que d'autres traversent plusieurs millimètres de plomb.

Les trajectoires décrites par les rayons β déviés par le champ magnétique sont circulaires et situées dans un plan normal à la direction du champ magnétique. Les rayons des circonférences décrites varient dans des limites étendues. Si l'on reçoit ces rayons sur une plaque photographique BC (fig. 16), la plaque se trouve impressionnée par des rayons qui, ayant décrit des trajectoires circulaires, sont rabattus sur

la plaque et viennent la couper à angle droit. M. Becquerel a montré que l'impression ainsi produite constitue une large bande diffuse, véritable spectre continu, prouvant que le faisceau de rayons déviables émis par la source est formé par une infinité de radiations inégalement déviables.

Si l'on recouvre la plaque de divers écrans absorbants, tels que du papier, du verre, des métaux, une portion seulement du spectre se trouve supprimée et l'on constate que les rayons les plus déviés par le champ magnétique, c'est-à-dire ceux dont la trajectoire a le plus petit rayon, sont le plus fortement absorbés. Pour chaque écran, l'impression sur la plaque ne commence qu'à une certaine distance de la source radiante ; cette distance est d'autant plus grande que l'écran est plus absorbant.

Les rayons β du radium sont chargés d'*électricité négative*. La démonstration expérimentale de ce dernier fait confirme l'analogie de ces rayons avec les rayons cathodiques. Les rayons cathodiques sont, en effet, comme l'a montré M. Perrin, chargés d'électricité négative : ils peuvent transporter leur charge à travers des enveloppes métalliques réunies à la terre et à travers des lames isolantes. En tous les points où les rayons cathodiques sont absorbés, il se fait un dégagement continu d'électricité négative.

Par une méthode analogue, il est facile de démontrer expérimentalement que les rayons β du radium sont chargés d'électricité négative. Cependant ce dégagement est faible ; aussi, pour le mettre en évidence, il est nécessaire que le conducteur qui absorbe les rayons soit parfaitement isolé. A cet effet, on place le conducteur à l'abri de l'air, soit en le noyant dans un bon diélectrique solide, soit en le plaçant dans un tube à vide très parfait.

L'appareil employé (fig. 20) se compose d'un disque conducteur M, relié par une tige métallique *t* à un électromètre. Le disque et la tige sont entourés d'une matière isolante *i* et le tout est recouvert d'une enveloppe métallique E en communication permanente avec la terre. Si l'on expose cet appareil au rayonnement d'un sel de radium R placé à l'extérieur dans une petite cuve en plomb, les rayons traversent la lame métallique, la lame isolante, et sont absorbés par le plateau M.

On constate alors à l'électromètre un dégagement continu d'électricité négative.

La quantité d'électricité produite est très faible, elle est de l'ordre de grandeur de 10^{-11} coulombs par seconde, pour un chlorure de baryum radifère très actif formant une couche de $2^{cmq}5$ de surface et de $0^{cm}2$ d'épaisseur, les rayons utilisés ayant traversé, avant d'être

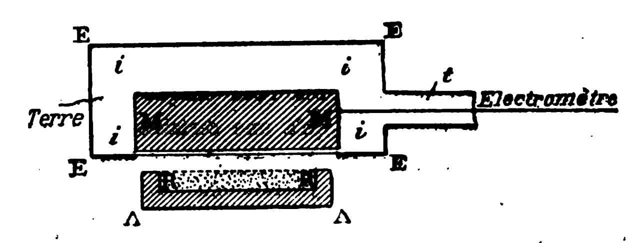


Fig. 20. — Appareil pour l'étude des rayons β.

absorbés par le conducteur M, une épaisseur d'aluminium de $0^{mm}01$ et une épaisseur d'ébonite de $0^{mm}3$.

Quand on éloigne le sel de radium ou qu'on emploie un produit moins actif, les charges sont plus faibles.

On peut faire l'expérience inverse, qui consiste à placer le sel de radium au milieu de la matière isolante et à mettre la cuvette qui contient le sel en relation avec l'électromètre (fig. 21). Dans ces condi-

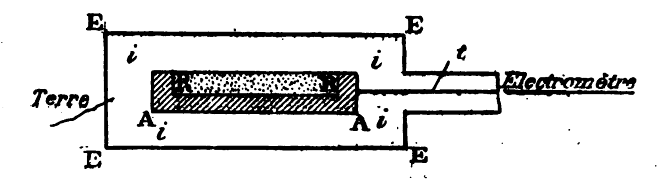


Fig. 21. — Appareil pour l'étude des rayons β.

tions, on constate que le radium prend une charge positive égale en grandeur à la charge négative de la première expérience. Les rayons très pénétrants du radium emportent avec eux les charges négatives.

Il résulte de ces deux expériences qu'un sel de radium enfermé dans une ampoule parfaitement isolante doit se charger spontanément

d'électricité comme une bouteille de Leyde. On peut aisément constater ce fait avec une ampoule scellée contenant depuis un certain temps un sel de radium. Si l'on fait avec un couteau à verre un trait sur la paroi de l'ampoule, il part à cet endroit une étincelle qui perce le verre aminci sous le couteau ; en même temps l'opérateur éprouve une petite secousse dans les doigts par suite du passage de la décharge.

Le radium est le premier exemple d'un corps qui se charge spontanément d'électricité.

On peut mettre encore ce dernier fait en évidence au moyen du petit appareil imaginé par M. Strutt, et qui est représenté par la figure 22. Une petite ampoule en verre R contient un sel de radium;

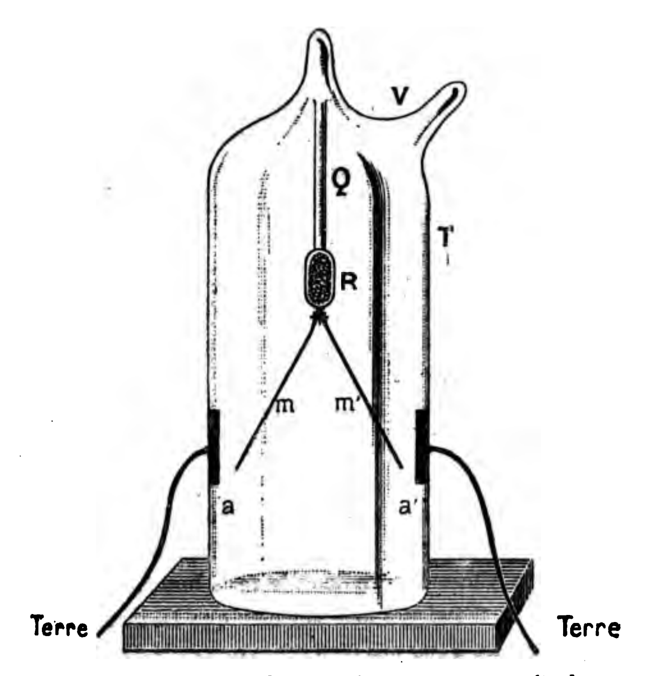


Fig. 22. — Appareil de Strutt à mouvement perpétuel.

elle est suspendue à une tige de quartz Q et le tout est placé dans un réservoir en verre T. Deux feuilles d'or très minces forment un petit électroscope ; ces feuilles, en s'écartant, peuvent venir toucher deux

lames métalliques *a* et *a'* mises en communication permanente avec la terre. On fait, dans le réservoir, un vide aussi parfait que possible, par la tubulure V.

Le fonctionnement de l'appareil est alors très simple. La charge positive de la petite ampoule de radium se communique aux feuilles d'or et celles-ci divergent progressivement à mesure que la charge augmente. Quand les feuilles sont suffisamment écartées, elles viennent toucher les deux lames *a* et *a'*, et la charge s'écoule au sol, les feuilles retombent, reprennent une autre charge et divergent de nouveau. Comme la production d'électricité est continue, les feuilles s'écartent et se rapprochent d'une façon permanente.

Les charges et décharges se succèdent à des intervalles de temps d'autant plus courts que la quantité de bromure de radium, dans l'ampoule, est plus grande. Pour que l'expérience réussisse d'une façon bien nette, il est nécessaire que l'ampoule de radium soit parfaitement isolée. C'est dans ce but que celle-ci a été suspendue à un fil de quartz qui constitue un très bon isolant, et que l'on a fait dans l'appareil un vide très parfait. On évite ainsi les fuites d'électricité occasionnées par le fait que l'air devient conducteur sous l'influence des substances radioactives.

On peut supposer que les rayons β sont constitués par des projectiles (électrons) chargés d'électricité négative et lancés à partir du radium avec une grande vitesse.

La mesure des déviations de ces rayons sous l'action d'un champ magnétique a permis à M. Becquerel, puis à M. Kaufmann de déterminer les vitesses de ces projectiles. Ces vitesses, variables pour les différents rayons β, sont comprises entre $2{,}36 \times 10^{10}$ centimètres par seconde et $2{,}83 \times 10^{10}$ centimètres par seconde. On voit que certains rayons β ont une vitesse voisine de celle de la lumière. D'autre part, des considérations théoriques font supposer que la masse de chacun de ces projectiles est *2 000 fois* plus petite que celle d'un atome d'hydrogène.

On conçoit aisément que des projectiles d'une masse aussi faible et animés d'une telle vitesse peuvent avoir un pouvoir pénétrant très grand vis-à-vis de la matière.

Les rayons du radium, et principalement les rayons *β*, peuvent se

diffuser. Si l'on envoie, sur un écran mince un faisceau de rayons provenant d'un sel de radium, les rayons α sont absorbés, les rayons γ traversent partiellement l'écran à l'état de faisceau bien défini aux bords nets; quant aux rayons β, ils sont diffusés dans tous les sens. Cependant, cette diffusion ne paraît pas une propriété constante des rayons β. M. Becquerel a montré qu'un faisceau de rayons β se propage à l'état bien défini dans la paraffine.

Rayons γ.

Les rayons γ sont tout à fait comparables aux rayons de Röntgen; ils ne possèdent donc aucune charge électrique. Ils ne forment qu'une très faible partie du rayonnement du radium. Certains rayons γ ont un pouvoir de pénétration extraordinaire; quelques-uns peuvent traverser plusieurs centimètres de plomb. Ils ionisent l'air faiblement et donnent une trace tout à fait nette, mais légère sur la plaque photographique. Toutefois, il est possible que l'énergie de ces rayons soit considérable, car si les effets sur la plaque sensible et les gaz sont faibles, cela tient en grande partie à la faible absorption subie par ces rayons.

En résumé, les rayons émis par le radium ont tous les caractères de ceux qu'émet l'ampoule de Crookes. Les *rayons α*, chargés positivement, correspondent aux *rayons-canaux* de Goldstein, les *rayons β* aux *rayons cathodiques* et les *rayons γ* aux *rayons de Röntgen*.

Les rayons du radium sont pourtant plus pénétrants. Tandis que les rayons-canaux ne parcourent, dans le vide, qu'une distance de quelques centimètres, les rayons α parcourent la même distance dans l'air à la pression atmosphérique. Les rayons cathodiques traversent difficilement une feuille d'aluminium de 4 millièmes de millimètre. Enfin, si les rayons de Röntgen peuvent traverser une épaisseur assez grande de certains corps opaques, ils sont complètement arrêtés par une feuille de plomb de 1 ou 2 millimètres d'épaisseur, tandis qu'on peut constater un effet appréciable des rayons γ à travers une épaisseur de plomb de 5 ou 6 centimètres.

CHAPITRE V

EFFETS PRODUITS PAR LE RAYONNEMENT DES SELS DE RADIUM

Effets de fluorescence et effets lumineux.

Les rayons émis par les sels de radium provoquent la fluorescence d'un très grand nombre de corps. Avec quelques substances, cette fluorescence peut être très belle, quand le produit radifère employé est très actif. Les sels alcalins et alcalino-terreux, le sulfate double d'uranyle et de potassium, les matières organiques (coton, papier, sulfate de cinchonine, peau), le quartz, le verre deviennent phosphorescents par l'action des rayons de Becquerel. Parmi les différentes espèces de verre, le verre de Thuringe est particulièrement lumineux. Les corps les plus sensibles sont le platinocyanure de baryum, qui prend une magnifique phosphorescence verte, et celui de potassium, qui devient bleu azur. La willémite (cristal de silicate de zinc naturel), le sulfure de zinc de Sidot, le diamant, prennent dans ces conditions un éclat très vif. Enfin, la kunzite, minéral trouvé en Amérique, devient rose-saumon.

Tous les groupes de rayons semblent capables de produire la phosphorescence; cependant la willémite et le platinocyanure de baryum sont particulièrement lumineux avec les rayons β pénétrants, tandis qu'avec les rayons α, il est préférable d'employer le sulfure de zinc de Sidot.

On peut encore observer la fluorescence du platinocyanure de baryum, même quand celui-ci est séparé du radium par un écran absorbant. L'écran de platinocyanure de baryum est encore lumineux quand on le sépare du radium par le corps humain.

La phosphorescence est très visible même quand le sel de radium est placé à 2 ou 3 mètres de l'écran. Dans ces conditions, il faut cependant que le sel employé soit très actif. Avec un cristal de platino-cyanure, la luminosité produite est très intense, surtout si le sel de radium est placé contre le cristal.

La belle phosphorescence obtenue avec le diamant est susceptible d'une application pratique. Il est, en effet, possible de distinguer, par l'action des rayons du radium, le diamant de ses imitations (strass, verres lourds). Ces derniers ont une luminosité extrêmement faible, comparée à celle du diamant.

Avec le sulfure de zinc, la luminosité persiste assez longtemps quand on supprime l'action du rayonnement.

On peut admettre que la luminosité spontanée des sels de radium est due à ce qu'ils se rendent eux-mêmes phosphorescents par l'action des rayons de Becquerel qu'ils émettent.

Dans certains cas, elle est suffisamment intense pour permettre la lecture d'un livre ; elle peut même se voir en plein jour. La lumière émise par le bromure est la plus forte.

Cette lumière a été récemment examinée par M. et Mme Huggins, au spectroscope. Ils ont constaté le fait très curieux que le spectre n'est pas parfaitement continu ; il présente des renforcements, dont les positions correspondent exactement aux bandes brillantes du spectre de l'azote, obtenu en analysant la lumière produite par des décharges électriques à travers ce gaz.

Il est naturel de penser que ces bandes sont dues aux décharges électriques du rayonnement du radium à travers l'air occlus ou environnant. La totalité de la lumière des sels de radium ne serait donc pas due à la phosphorescence de ceux-ci.

Coloration des corps par l'action des rayons du radium.

En général, les substances phosphorescentes, soumises à une action prolongée des sels de radium, sont peu à peu altérées et deviennent alors moins excitables et moins lumineuses sous l'action de ces sels. En même temps, on constate que la plupart de ces corps subissent une altération très notable dans leur coloration. Il est, d'autre part, possible

d'admettre que ces variations de coloration sont accompagnées d'une modification chimique de la substance phosphorescente.

Les rayons du radium colorent le verre en violet, en brun ou en noir; cette coloration se produit dans la masse même du verre et persiste quand on éloigne le sel de radium qui l'a produite. Les sels alcalins se colorent en jaune, en violet, en bleu ou en vert; le quartz transparent se transforme en quartz enfumé; la topaze incolore devient aune orangé, etc.

Sous l'action du rayonnement du radium, le platinocyanure de baryum brunit; mais il reprend partiellement sa teinte primitive quand on l'expose pendant quelque temps à la lumière. Le sulfate d'uranyle et de potassium jaunit.

Le verre coloré par le radium et chauffé ensuite vers 500 degrés se décolore. En même temps, cette décoloration est accompagnée d'une émission de lumière. Ce phénomène, connu sous le nom de *thermoluminescence*, avait déjà été observé sur certains corps, tels que la fluorine. La fluorine devient lumineuse quand on la chauffe. Cette luminosité s'épuise peu à peu. On peut cependant lui restituer la faculté de devenir lumineuse par la chaleur, en l'exposant à l'action d'une étincelle ou d'un sel de radium. Dans ces conditions, la fluorine revient à son état primitif.

Le phénomène est identique avec le verre exposé aux rayons du radium. Il se produit une transformation dans le verre pendant qu'il est soumis à l'action des sels de radium, puisque la coloration augmente progressivement; quand on chauffe, la transformation inverse se produit, la coloration disparaît et le phénomène est accompagné d'une émission de lumière. Le verre est ramené à son état primitif; il est susceptible d'être coloré à nouveau par l'action des rayons du radium.

Il est possible qu'il y ait là une modification d'ordre chimique à laquelle la production de la lumière serait intimement liée. Ce phénomène peut être général; la fluorescence produite par l'action des sels de radium dépendrait d'une transformation chimique ou physique de la substance qui émet la lumière.

Effets chimiques et photographiques.

Les rayons du radium provoquent diverses actions chimiques. On pourrait déjà ranger dans ce groupe tous les phénomènes de fluorescence et de coloration précédemment décrits.

En dehors de ces considérations, les radiations émises par les sels de radium sont susceptibles de produire des réactions chimiques bien nettes. Ainsi le phosphore blanc se transforme en phosphore rouge.



Fig. 23. — Radiographie obtenue avec les sels de radium.

Dans le voisinage des sels de radium, on peut constater dans l'air la production d'ozone. Cependant, pour que l'ozone puisse se produire, il est nécessaire qu'il y ait communication directe, si petite soit-elle, entre l'air à ozoniser et le radium. Cette réaction semble plutôt liée au phénomène de la radioactivité induite que nous étudierons plus loin.

Le papier est coloré en jaune par l'action du radium; simultanément il devient fragile et s'effrite très facilement.

Les sels de radium eux-mêmes semblent éprouver une altération sous l'action du rayonnement qu'ils émettent. Ils se colorent, dégagent des composés oxygénés du chlore, si le sel est un chlorure, et du brome, si le sel est un bromure. M. Giesel a montré qu'une solution d'un sel de radium dégage de l'hydrogène d'une façon continue. Le rayonnement du radium agit sur les substances employées en photographie de la même manière que la lumière. Cette propriété, jointe à la plus ou moins grande transparence des diverses substances pour le rayonnement, permet d'obtenir des radiographies comparables

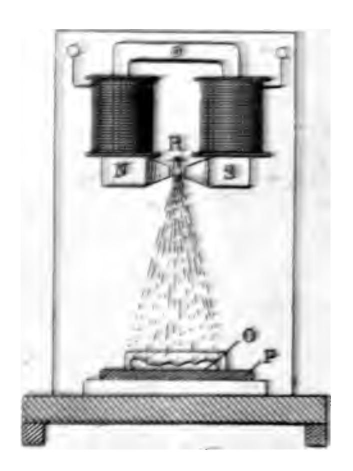


Fig. 24. — Dispositif pour obtenir des radiographies avec les sels de radium.

à celles obtenues avec les rayons X, et cela beaucoup plus simplement. Une petite ampoule en verre contenant quelques centigrammes d'un sel de radium remplace le tube de Crookes et les nombreux appareils qu'il exige pour son fonctionnement.

On peut opérer à grande distance et avec des sources de très petites dimensions : on obtient alors des radiographies assez fines (fig. 23). Dans ces conditions, on utilise les rayons β et γ, les rayons α étant très rapidement absorbés. Les radiographies ainsi obtenues manquent de netteté ; les rayons β, en traversant l'objet à radiographier, éprouvent, en effet, de la diffusion et occasionnent un certain flou.

Pour obtenir des radiographies bien nettes, il est utile de supprimer les rayons β en les faisant dévier par un électro-aimant puissant. On emploie, à cet effet, le dispositif représenté par la figure 24. L'objet à radiographier O est placé sur la plaque photographique entourée de papier noir P. L'ampoule de sel de radium est placée en R entre les pôles d'un électro-aimant ; si l'on excite cet électro-aimant, les rayons γ sont seuls utilisés ; comme ils ne forment qu'une faible partie du rayonnement total, la pose doit être considérablement augmentée. Il faut alors plusieurs jours pour obtenir une radiographie. La radiographie d'un objet, tel qu'un porte-monnaie, demande un jour avec une source radiante constituée par quelques centigrammes de sel de radium, enfermés dans une ampoule de verre et placés à 1 mètre de la plaque sensible devant laquelle se trouve l'objet.

Si l'ampoule est placée à 20 centimètres de distance de la plaque sensible, le même résultat est obtenu en une heure.

Tous les sels de radium assez actifs doivent être exclus du laboratoire de photographie, sous peine d'altérer les substances photographiques sensibles qui peuvent s'y trouver.

Action ionisante des rayons du radium.

Les rayons du radium rendent l'air qu'ils traversent conducteur de l'électricité. On est convenu d'utiliser cette propriété importante dans la mesure du rayonnement des substances radioactives.

Quand on approche quelques décigrammes d'un sel de radium d'un électroscope chargé, celui-ci se décharge immédiatement. La décharge se produit encore, mais toutefois plus lentement, quand on protège l'électroscope par une paroi métallique épaisse. Le plomb, le platine absorbent facilement les radiations ; l'aluminium, au contraire, est le métal le plus transparent. Les substances organiques sont relativement très transparentes pour les rayons de Becquerel.

L'expérience suivante, imaginée par M. Curie, met en évidence, d'une façon très brillante, la conductibilité acquise par l'air sous l'influence des sels de radium.

Le secondaire d'une bobine d'induction B (fig. 25) est relié par des fils métalliques à deux micromètres à étincelles M et M' éloignés

suffisamment l'un de l'autre et offrant deux chemins distincts équivalents pour le passage de l'étincelle.

On règle les micromètres de telle sorte que les étincelles passent à peu près aussi abondantes entre les boules de chacun d'eux. Si l'on approche de l'un des micromètres une ampoule contenant un sel de radium, les étincelles cessent de passer à travers l'autre, le chemin offert par le premier micromètre étant beaucoup moins résistant que le chemin offert par le second.

L'expérience réussit encore très bien si l'ampoule de radium est protégée par une plaque de plomb de plusieurs centimètres d'épais-

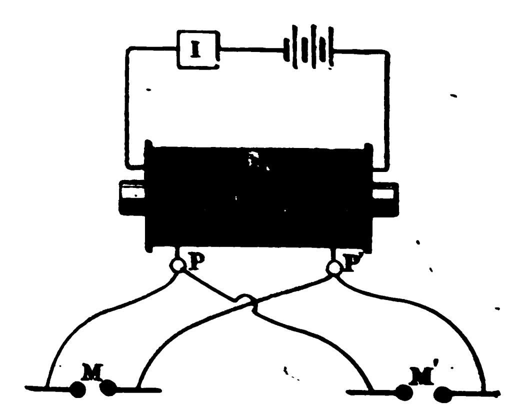


Fig. 25. — Dispositif pour vérifier la conductibilité donnée à l'air par les sels de radium.

seur; l'action de l'étincelle n'est pas fortement diminuée, alors que la plus grande partie du rayonnement est arrêtée par la plaque. Il semble que, dans ce phénomène, les rayons très pénétrants soient les plus efficaces.

Le mécanisme de la conductibilité produite dans les gaz par les rayons de Becquerel est analogue à celui qui est relatif aux rayons de Röntgen. Sous l'influence du rayonnement, le gaz est ionisé, c'est-dire que ses molécules subissent une dissociation particulière dont ésultat final est de créer, dans le gaz, des centres chargés d'électé appelés *ions*. Ce gaz ionisé, placé dans un champ électrique, se

porte comme un gaz conducteur. Plus la substance est active, ı le nombre d'ions produit est grand et plus élevée est la conduc-ité. La conductibilité est donc intimement liée à l'activité de la stance; cette dernière considération justifie en partie l'application de e propriété à la mesure du rayonnement des substances radioactives. ans un laboratoire où l'on travaille avec les sels de radium, il est ossible d'avoir un appareil bien isolé, car l'air de la pièce est con-teur. On est obligé d'employer des dispositifs spéciaux, tels que ıi qui consiste à entourer de diélectriques solides les conducteurs rgés.

l. Curie a montré que les rayons du radium agissent sur les dié-riques liquides comme sur l'air, en leur communiquant une cer-ıe conductibilité électrique. On peut constater ce phénomène avec ıer de pétrole, l'huile de vaseline, la benzine, l'amylène, le sulfure :arbone, l'air liquide.

:mploi des sels de radium dans l'étude de l'électricité atmosphérique.

.es sels de radium peuvent remplacer avantageusement les flammes les appareils à gouttes d'eau de lord Kelvin, généralement employés ıu'à présent dans l'étude de l'électricité atmosphérique. A cet effet, el de radium est enfermé dans une petite boîte métallique plate, ıt l'une des faces est constituée par une lame d'aluminium très ıce. Cette boîte est fixée à l'extrémité d'une tige métallique en ıtion avec un électromètre. L'air est rendu conducteur au voisinage l'extrémité de la tige et celle-ci prend le potentiel de l'air qui l'en-re. Les mesures s'effectuent à l'électromètre.

Effets physiologiques.

ɜs rayons du radium provoquent diverses actions physiologiques. ›nt une action très nette sur l'épiderme.

· l'on place sur la peau une petite capsule en celluloïd renfermant sel de radium très actif et si on l'y laisse pendant quelque temps, ı'éprouve aucune sensation particulière, mais quinze à vingt jours

après, il se produit sur la peau une tache rouge, puis une escarre dans la région où a été appliquée l'ampoule ; si l'action du radium a été assez longue, il se forme ensuite une plaie qui peut mettre plusieurs mois à guérir.

Dans une expérience, M. Curie a fait agir sur son bras un produit radiant relativement peu actif pendant dix heures. La rougeur se manifesta de suite, et il se forma plus tard une plaie qui mit quatre mois à guérir. L'épiderme a été détruit localement, et n'a pu se reconstituer à l'état sain que lentement et péniblement, avec formation d'une cicatrice très marquée. Dans une autre expérience, l'exposition au sel de radium a duré une demi-heure et la brûlure n'est apparue qu'au bout de quinze jours. Il se forma une ampoule qui mit quinze jours à guérir. Enfin, dans une troisième expérience, l'exposition ayant duré seulement huit minutes, la tache rouge ne se montra que deux mois après ; l'effet fut d'ailleurs insignifiant.

Les résultats précédents indiquent qu'il faut éviter de garder longtemps sur soi un sel de radium autrement qu'enveloppé dans une feuille de plomb très épaisse.

L'action des rayons du radium sur la peau est analogue à celle que produisent les rayons de Röntgen ou la lumière ultra-violette. Elle peut se produire à travers des corps quelconques, mais les effets sont moins marqués.

Ces quelques expériences ont été le point de départ de tentatives multiples de guérison des lupus, des cancers, et de diverses autres maladies de la peau. Le radium a donné, jusqu'à ce jour, des résultats encourageants. La technique du traitement de ces maladies est très simple : l'épiderme partiellement détruit par l'action des rayons du radium se reforme à l'état sain.

L'action du radium sur la peau a été étudiée par M. le docteur Danlos, à l'hôpital Saint-Louis, comme procédé de traitement du lupus.

M. Danlos a observé que la surface malade, soumise à l'action du radium, présente une série de modifications d'intensité progressive. Tout d'abord et peu à peu, il se forme une tache rouge ; après un temps variant de six à vingt jours, suivant l'état antérieur, l'épiderme prend un aspect blanchâtre et finit par tomber ; de petites plaies isolées se produisent, s'agrandissent, et constituent finalement une ulcération

qui secrète un liquide rougeâtre assez abondant. Un mois après, l'ulcération se ferme et une cicatrice se forme, blanche, lisse et souple.

Ce traitement serait fort simple et assez rapide en comparaison des procédés anciens. Il se fait sans douleur et n'occasionne que bien rarement des cicatrices difformes.

A l'heure actuelle, un très grand nombre d'essais sont poursuivis tant à Paris, qu'à Vienne, à Londres ou à New-York. Il manque cependant encore la sanction de l'expérience, mais on peut espérer que le traitement des maladies de la peau par le radium prendra une place importante à côté de la thérapeutique par les rayons de Röntgen, dont les succès sont déjà assez nombreux. Si les effets obtenus sont comparables à ceux produits par les rayons de Röntgen ou la lumière ultra-violette, il est probable que l'on préférera le traitement par les rayons du radium, car, avec quelques décigrammes de substance, on évitera l'achat d'un matériel coûteux, encombrant, et d'une manipulation assez délicate.

M. Giesel a montré que les rayons du radium agissent sur l'œil. Quand on place dans l'obscurité une ampoule contenant un sel de radium au voisinage de la paupière fermée ou de la tempe, il se produit dans l'œil une sensation de lumière. MM. Himstedt et Nagel ont montré que, dans ces expériences, les milieux de l'œil deviennent lumineux par phosphorescence sous l'action des rayons du radium et la lumière que l'on aperçoit a sa source dans l'œil lui-même. Les aveugles, chez lesquels la rétine est intacte, sont sensibles à l'action du radium, tandis que ceux dont la rétine est malade n'éprouvent pas la sensation lumineuse due aux rayons.

Le rayonnement du radium a un effet bactéricide ; il empêche ou entrave le développement des colonies microbiennes. Cette action est cependant peu intense.

M. Danysz, à l'Institut Pasteur, a étudié particulièrement l'action des rayons sur la moelle et sur le cerveau. Cette action est très énergique. M. Danysz a constaté que si l'on plaçait, pendant une heure, une ampoule contenant un sel de radium très actif le long de la colonne vertébrale d'une souris, l'animal était paralysé au bout de quelques jours et mourait rapidement. Des faits analogues se présentent, si l'on place l'ampoule sur la masse cérébrale d'un lapin dont on a trépané le crâne.

M. Bohn a montré que le radium modifie les tissus des animaux en voie de croissance.

M. Giesel a enfin remarqué que les feuilles des plantes soumises à l'action du rayonnement du radium jaunissaient, puis s'effritaient.

M. Matout a fait quelques expériences sur la germination de graines exposées au rayonnement du radium avant d'être plantées. Après une exposition qui a duré environ une huitaine de jours, des graines de cresson et de moutarde blanche plantées ultérieurement n'ont pas germé. Le rayonnement du radium a donc altéré la graine au point de détruire la faculté de germer.

Action de la température sur le rayonnement.

Le rayonnement du radium est le même, que le radium soit placé dans l'air liquide ($t = -180$ degrés) ou qu'il soit à la température ambiante. Diverses expériences le démontrent. Ainsi la luminosité d'un sel de baryum radifère persiste, si l'on plonge dans l'air liquide l'ampoule qui contient le radium. A la température de l'air liquide, le radium continue à exciter la fluorescence du platinocyanure de baryum. Si l'on place au fond d'une éprouvette en verre une ampoule contenant un sel de radium et un petit écran au platinocyanure de baryum rendu lumineux par le voisinage du radium, et qu'on plonge ensuite l'éprouvette dans l'air liquide, on constate que l'écran au platinocyanure de baryum est aussi lumineux qu'avant l'immersion.

Tels sont, rapidement résumés, les principaux effets du rayonnement des sels de radium.

Il nous reste à étudier un phénomène de nature différente et d'une portée considérable par ses conséquences. Ce phénomène, connu sous le nom de *radioactivité induite*, fera l'objet de la dernière partie de cette étude.

CHAPITRE VI

A RADIOACTIVITÉ INDUITE ET L'ÉMANATION DU RADIUM

Phénomène d'activation.

ıs les corps solides, liquides ou gazeux, placés pendant quelque s au voisinage d'un sel de radium, acquièrent les propriétés ra-es de celui-ci ; ils deviennent radioactifs et émettent à leur tour ayons de Becquerel. Il y a en quelque sorte transmission d'acti-lu sel de radium aux corps mis en sa présence. Ce fait constitue énomène de la *radioactivité induite.*

radioactivité induite se propage dans les gaz de proche en proche onduction. Du reste, les gaz eux-mêmes, au voisinage des sels de m, deviennent radioactifs.

phénomène se produit d'une façon particulièrement intense si ace les corps à activer, dans une enceinte fermée, avec un sel de m solide ou mieux avec une solution d'un sel de radium. De M. Rutherford a montré que l'activité prise par les corps était :oup plus considérable quand on les portait à un potentiel élec-ꞔ négatif par rapport aux corps environnants.

posons, dans une enceinte close M remplie d'air (fig. 26), un sel de m placé dans une petite capsule *a* et diverses substances telles ı, B, C, D, E.

ıs ces conditions et au bout d'un temps suffisant, tous les corps se ıctivés. On peut alors les soustraire à l'action du radium, les r de l'enceinte et constater qu'ils sont devenus le siège d'une ion de rayons de Becquerel. L'activité de ces substances pourra léterminée au moyen du dispositif indiqué plus haut pour la re de l'activité des substances radioactives.

L'activité prise par les corps B, C, D, E est la même quelle que soit leur nature (plomb, cuivre, verre, ébonite, carton, paraffine, celluloïd). Cependant l'activité d'une face de l'une des lames est d'autant plus élevée que l'espace libre en regard de cette face est plus grand. Ainsi la face intérieure de l'une des lames A est moins active que sa face extérieure.

Les corps activés et éloignés des sels de radium conservent un certain temps leur activité ; celle-ci diminue peu à peu et finit par disparaître.

On constate que l'activité de la lame augmente d'abord avec la

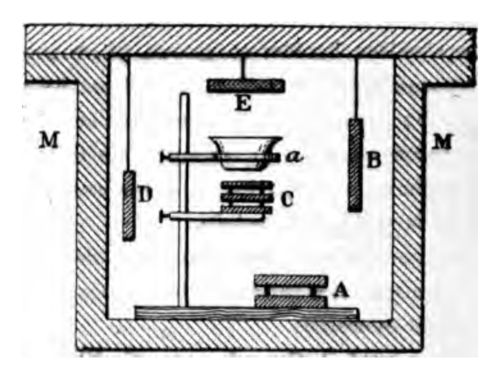


Fig. 26. — Activation des corps dans une enceinte fermée.

durée du séjour dans l'enceinte, mais qu'elle atteint une certaine valeur limite pour un séjour assez prolongé.

La nature et la pression du gaz de l'enceinte et la position relative des substances à activer n'ont aucune influence sur les phénomènes observés, et l'activité prise par les différents corps est proportionnelle à la quantité de sel de radium qui s'y trouve.

Le rayonnement du sel de radium ne joue aucun rôle dans la production de la radioactivité induite ; on peut, en effet, recommencer l'expérience précédente après avoir enfermé le sel de radium dans une ampoule scellée. Après plusieurs jours, on peut constater à l'électroscope qu'aucune des lames placées dans l'enceinte n'émet de rayons de Becquerel ; elles ne se sont pas activées. Pour que les corps puissent

acquérir la propriété d'émettre des rayons de Becquerel, il est nécessaire que ces corps soient en relation, directe ou par l'intermédiaire d'une substance gazeuse, avec le sel de radium.

L'émanation du radium.

Pour expliquer ces phénomènes, nous pouvons supposer avec M. Rutherford que le radium dégage, d'une façon continue, un gaz matériel radioactif, que l'on nomme *émanation*. Cette émanation se répand dans l'espace, se mélange aux gaz qui entourent le sel de radium et peut venir agir sous une forme particulière à la surface des corps solides pour les rendre radioactifs. Les phénomènes de la radioactivité induite seraient donc le résultat d'un transport d'énergie radioactive effectué par l'émanation.

Tous les gaz placés au voisinage des sels de radium deviennent radioactifs; d'après l'hypothèse précédente, ils sont chargés d'émanation. Ces gaz peuvent donc communiquer de l'activité aux corps solides que l'on met en leur présence.

Si l'on transporte ce gaz activé dans une autre enceinte, il conserve pendant un temps assez long la propriété de rendre radioactifs les corps solides amenés en contact avec lui; cependant, dans ces conditions, l'émanation entraînée avec le gaz se détruit spontanément, et le gaz perd ses propriétés activantes. Cette vitesse de destruction est telle que la quantité d'émanation répandue dans le gaz diminue de moitié en quatre jours.

Les sels de radium sont le siège d'un débit constant d'émanation. Si l'on enferme une solution d'un sel de radium dans une ampoule à moitié pleine de liquide, l'émanation s'accumule dans le gaz au-dessus de la solution. La quantité d'émanation accumulée ne croît pas indéfiniment; l'émanation se détruit partiellement, en effet, pendant que le radium en produit une nouvelle quantité; l'équilibre limite est obtenu quand la perte résultant de la disparition de l'émanation compense la production continue d'émanation du sel de radium.

Disparition de la radioactivité induite par les sels de radium dans une enceinte fermée.

Supposons que l'on accumule de l'émanation dans un tube A (fig. 27) en le mettant en communication avec une ampoule B, contenant un sel de radium en solution S. Au bout de quelques jours, l'air contenu dans le tube A s'est chargé d'émanation : il est devenu radioactif et a communiqué de l'activité aux parois. Si l'on sépare ensuite le tube de l'ampoule en fermant à la lampe la partie *a*, on peut constater que le tube A émet des rayons de Becquerel.

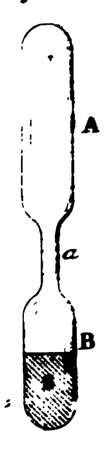


Fig. 27. — Prise d'émanation dans un tube.

A cet effet, on emploie un dispositif expérimental analogue à celui qui a servi à déterminer l'intensité du rayonnement des matières radioactives, mais on remplace le condensateur à plateaux par un condensateur cylindrique. Ce condensateur (fig. 28) se compose essentiellement de deux tubes concentriques, dont l'un B, en aluminium mince, est relié à une pile d'un grand nombre d'éléments, et l'autre, en cuivre, est mis en communication avec l'électromètre et le quartz. L'ensemble de ces deux tubes est placé dans une caisse métallique E mise à la terre.

On peut à l'aide de cet appareil étudier le rayonnement extérieur

du récipient A, en le plaçant dans le cylindre intérieur du condensateur. Les rayons émis par le tube rendent conducteur l'air entre les deux cylindres. Le courant qui circule est compensé à chaque instant par le quartz piézo-électrique.

On constate alors que le rayonnement extérieur du tube A diminue avec le temps, suivant une loi exponentielle rigoureuse. Cette loi est

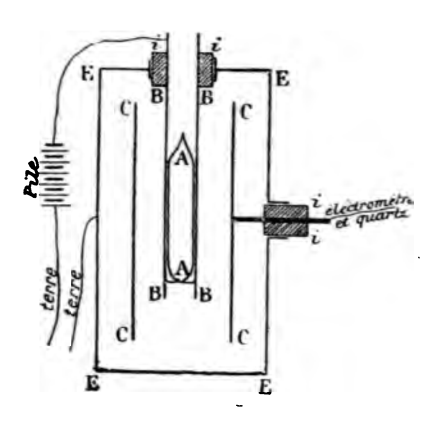


Fig. 28. — Condensateur cylindrique pour la mesure de l'activité des tubes actifs.

de la forme : $I = I_0 e^{-kt}$, I_0 étant la valeur initiale, et I la valeur, à l'instant t, du rayonnement. En prenant la seconde pour unité, on a $k = 2{,}01 \times 10^{-6}$. Le rayonnement baisse *de moitié en quatre jours.* Cette loi de désactivation (fig. 29) est absolument invariable, quelles que soient les conditions de l'expérience (dimensions et nature du réservoir, pression et nature du gaz, intensité du phénomène au début, température). La constante de temps qui caractérise la disparition de l'activité du tube est une donnée caractéristique des sels de radium utilisés pour le rendre actif. Cette constante pourrait servir à définir un étalon de temps.

Cette loi est, en réalité, la loi de disparition spontanée de l'émanation. En effet, si, après avoir activé un tube tel que A, on y fait le vide de manière à extraire l'air chargé d'émanation, on constate que le rayonnement diminue beaucoup plus rapidement : il baisse de moi-

tié pendant chaque demi-heure. Cette loi de désactivation est la même que celle suivant laquelle les corps solides activés perdent à l'air libre leur activité. On est conduit à admettre que l'activité de l'enceinte A est entretenue en partie par l'émanation qu'elle contient, et que la loi trouvée correspond bien à la destruction de l'émanation.

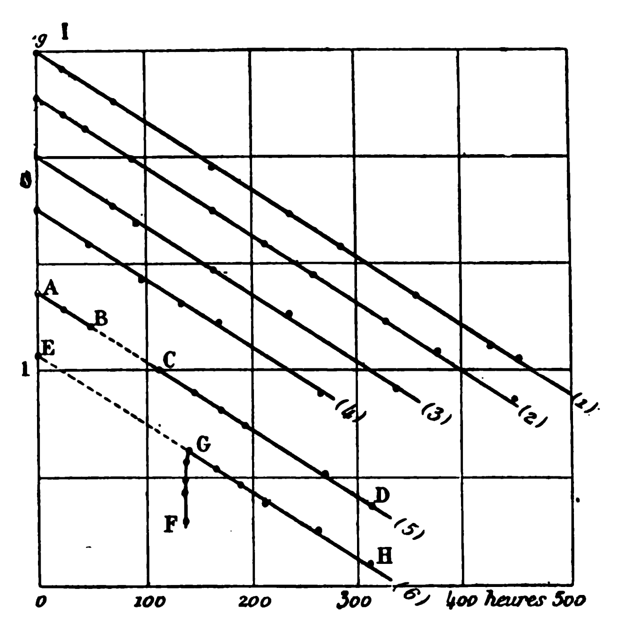


FIG. 29. — Courbes de disparition de la radioactivité induite par les sels de radium dans une enceinte fermée.

Si, après avoir activé un tube tel que A, on mesure son rayonnement immédiatement avant et après l'extraction de l'air, on constate que ce rayonnement n'a pas changé au moment où on a retiré l'air actif. Le rayonnement de l'air chargé d'émanation ne produit donc pas d'action dans cette expérience. Il est possible cependant qu'il existe, mais il doit être constitué par des rayons très peu pénétrants, incapables de traverser la paroi du verre.

L'expérience suivante donne une confirmation bien nette de cette hypothèse. Un tube métallique A (fig. 30) communique avec une solution d'un sel de radium S et est fermé à l'autre extrémité par un bou-

chon isolant *i*; ce bouchon est traversé par une tige métallique C reliée à l'électromètre. Le tube et la tige forment un condensateur cylindrique; le tube métallique est relié à une pile d'un grand nombre d'éléments. Le tube BB est relié à la terre et sert de tube de garde. Quand le tube A est activé, on le sépare du radium, on mesure l'in-

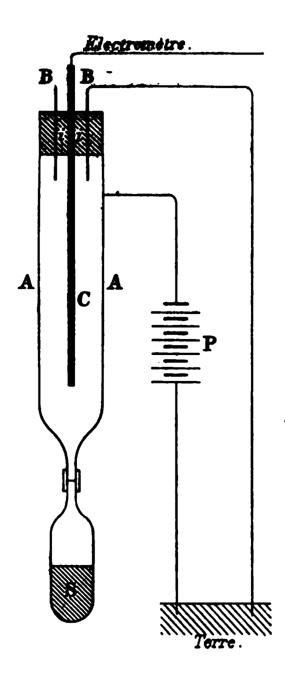


FIG. 30. — Dispositif pour l'étude du rayonnement de l'émanation.

tensité du courant qui traverse le condensateur, on renouvelle alors l'air et on fait immédiatement une nouvelle mesure de l'intensité du courant. On constate que le courant est devenu six fois plus faible. Or, pendant la deuxième mesure, le rayonnement des parois activées agit seul pour ioniser l'air du condensateur, tandis que, pendant la première mesure, l'émanation agit également; on peut donc supposer qu'elle aussi émet un rayonnement. Ce rayonnement est nécessairement très peu pénétrant puisqu'il ne fait pas sentir son action à l'extérieur.

[illegible]

[illegible]

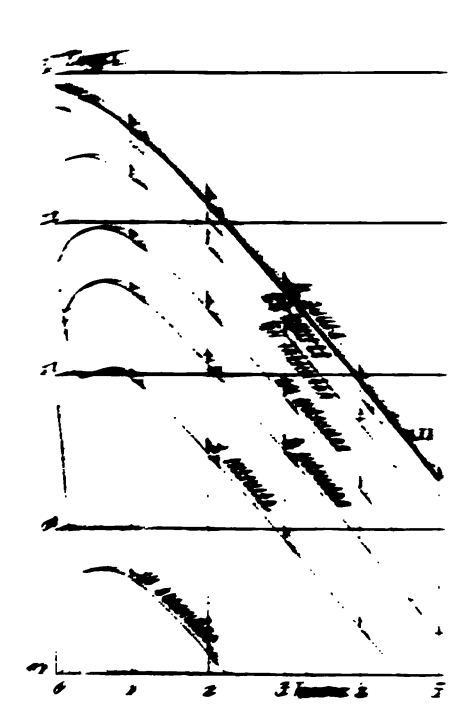


Fig. 34. — Influence de la durée d'activation sur la loi de désact...

Si le corps a été soumis à l'action de l'émanation pendant vingt-quatre heures, la loi de désactivation est donnée par la dif... de deux exponentielles.

Cette loi est alors de la forme : $I = I_0 (a e^{-\lambda t} - (a - 1) ...$

I_0 étant l'intensité du rayonnement à l'origine du temps *t*. C'est-à-dire au moment où l'on soustrait la lame à l'action de l'émanation. Les coefficients ont pour valeurs : $a = 4,2$; $b = 0,000413$; $c = 0,000538$.

Cette loi de désactivation est représentée par la courbe 1 de la figure 31. On a porté en ordonnées les logarithmes de l'intensité du rayonnement et en abscisses les temps. Deux heures après le commencement de la désactivation, l'une des deux exponentielles est de-

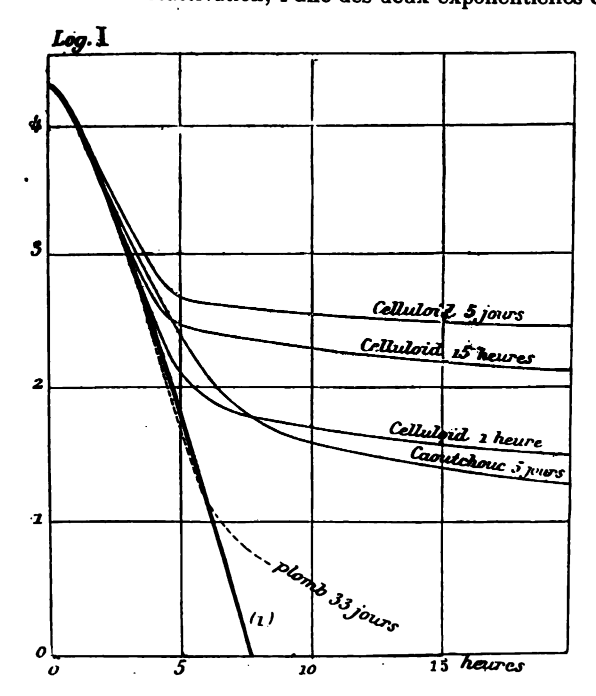


FIG. 32. — Loi de désactivation de quelques substances qui retiennent de l'émanation occluse.

La courbe (1) est la courbe normale.

venue négligeable par rapport à la première, et la courbe représentant la loi est, en raison du choix des unités, représentée par une droite. L'activité baisse de moitié en vingt-huit minutes.

Si la durée d'activation a été inférieure à vingt-quatre heures, la loi de désactivation devient excessivement complexe, et les courbes représentatives du phénomène prennent des formes assez variées. Pour

une activation de quelques secondes, par exemple, on constate d'a une baisse brusque d'activité, puis le rayonnement augmente, par un maximum et recommence à diminuer; deux heures a l'activité a pris sa valeur normale : elle baisse de moitié en vingt minutes. Dans ce cas, l'interprétation du phénomène devient assez cate, mais présente, cependant, un très haut intérêt théorique. O conduit à supposer que, sur la lame activée, l'énergie radioa affecte trois états successifs distincts.

Quand on retire de l'enceinte activante des corps quelconque constate que ces corps peuvent émettre eux-mêmes une petite q tité d'émanation. Il semble que les substances s'en soient im gnées, et qu'elles la dégagent ensuite. La plupart des corps per cette petite quantité d'émanation occluse pendant les vingt mir qui suivent le début de la désactivation. Cependant, certains c solides, tels que le celluloïd, le caoutchouc, la paraffine, ont la priété de s'imprégner d'émanation et d'en émettre ensuite pen plusieurs heures et même plusieurs jours. La loi de désactivatio complètement modifiée (fig. 32).

Si la durée du séjour en présence de l'émanation a été très p longée, les corps soustraits à cette action se désactivent d'ab suivant la loi ordinaire (de moitié en vingt-huit minutes), mais l'acti ne disparaît pas complètement ; il reste une activité plusieurs mill de fois plus faible qu'au début et qui se manifeste pendant quelq années.

Activité induite des liquides.

Les liquides peuvent devenir radioactifs. Si l'on place dans u enceinte un sel de radium avec des liquides tels que l'eau, les so tions salines, l'essence de pétrole, on constate que ces liquides s'a vent faiblement ; il semble que l'émanation s'y dissolve, car si l enferme ces liquides dans une ampoule scellée, le rayonnement én par celle-ci diminue de moitié en quatre jours.

Rayonnement des sels de radium en solution.

Si l'on place dans un tube scellé une solution d'un sel de radium, on peut constater, au bout de quelque temps, en portant le tube dans l'obscurité, que le verre du tube est lumineux. La portion de ce tube en contact avec le gaz est plus fortement lumineuse que celle en contact avec la solution ; le gaz chargé d'émanation agit fortement sur la paroi du tube. La solution n'émet plus que très peu de rayons, alors que le gaz chargé d'émanation rayonne fortement ainsi que la paroi. Dans ces conditions, tout se passe comme si le sel de radium ne se comportait plus que comme producteur d'émanation : ses propriétés se sont modifiées, et sa radioactivité se trouve extériorisée.

On peut constater, en outre, que l'activité du gaz augmente et atteint un régime stable qu'un mois après la fermeture de l'ampoule. Cet équilibre s'établit quand la perte spontanée d'activité devient égale à la production d'émanation.

Les quelques considérations précédentes permettent d'expliquer la variation d'activité des sels de radium par la chauffe ou la dissolution. On peut, en effet, admettre que l'émanation produite par le radium ne peut s'échapper que bien difficilement du sel solide, qu'elle s'y accumule en se transformant en radioactivité induite. La chauffe a pour effet de provoquer le dégagement d'émanation. Le sel, ramené à température initiale, émet beaucoup moins de rayons. Il reprend peu à peu son activité, grâce au débit continu d'émanation qu'il produit et qui s'accumule dans le sel lui-même sous forme de radioactivité induite.

L'effet de la dissolution est analogue : la dissolution effectue un état de division de la matière tel, que l'émanation peut s'échapper facilement. Si l'on évapore la solution, le sel sec est d'abord peu actif, mais il reprend peu à peu son activité primitive par un mécanisme identique au précédent.

CHAPITRE VI

[illegible]

[illegible]

[illegible] du radium provoque d'une [illegible] très [illegible] la phos-phorescence d'un grand nombre de corps. Les réservoirs de verre con-tenant [illegible] l'émanation sont lumineux, le verre de Thuringe [illegible] sensible. Le sulfure de zinc de Sidot est particulièrement brillant sous l'action de l'émanation et donne alors une lumière très intense. On peut, par exemple, faire l'expérience au moyen d'un appareil constitué par un gros réservoir en verre [illegible] d'une des parois [illegible] de sulfure de zinc (fig. 35). [illegible] le vide dans le [illegible] par le tube T et on aspire ensuite de l'air chargé d'émana-tion provenant d'un réservoir A. Le tube A contient une solution de sel de radium et l'émanation dégagée s'est accumulée dans la partie [illegible] du tube [illegible] le robinet R. Le réservoir B devient très lumineux et la lumière émise par le sulfure de zinc est suffisamment intense pour qu'on puisse lire à 10 ou 20 centimètres du tube.

Diffusion de l'émanation.

Les sels de radium dégagent de l'émanation d'une façon continue. Cette émanation se répand peu à peu au milieu du gaz qui entoure le sel de radium, elle se diffuse dans les gaz : elle peut se propager d'un réservoir à un autre même par un tube capillaire.

L'étude de la diffusion de l'émanation par les tubes capillaires a permis de déterminer la valeur du coefficient de diffusion. La méthode employée est très simple ; elle consiste à mesurer, en fonction du

temps, le rayonnement de Becquerel émis par un réservoir en verre rempli d'air activé. Ce réservoir communique avec l'atmosphère par un tube capillaire. La mesure du rayonnement du tube s'effectue au moyen de l'appareil décrit plus haut (fig. 28). De la mesure du rayonnement, on déduit la loi de l'écoulement de l'émanation.



Fig. 33. — Phosphorescence provoquée par l'émanation du radium.

On trouve alors que la vitesse de l'écoulement de l'émanation est proportionnelle à la quantité d'émanation qui se trouve dans le réservoir; elle varie proportionnellement à la section du tube capillaire et en raison inverse de sa longueur. Le coefficient de diffusion de l'émanation dans l'air est égal à 0,10, à la température de 10 degrés. Il est donc voisin de celui de l'acide carbonique dans l'air, qui est égal à 0,15.

L'émanation du radium et la loi de Gay-Lussac.

L'émanation du radium suit la loi de Gay-Lussac; elle se dilate comme un gaz. L'expérience peut être faite de la manière suivante : Deux réservoirs A et B (fig. 34) remplis d'émanation communiquent par un tube *t*. On mesure dans un condensateur cylindrique le rayonnement de l'un des tubes A, l'autre étant maintenu à la température ambiante. Si l'on porte ce dernier à une température supérieure T, le rayonnement du tube A augmente et subsiste aussi longtemps que l'on maintient B à la température T. La quantité d'émanation qui est entrée dans le réservoir B est bien la même que celle que l'on calculerait en appliquant la loi de Gay-Lussac.

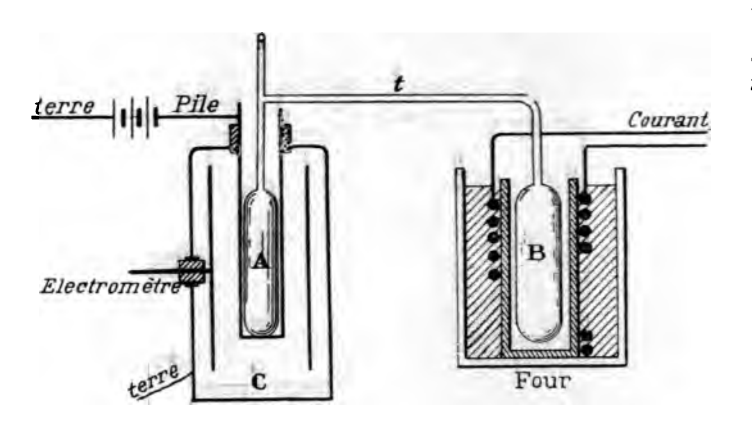


Fig. 34. — Vérification de la loi de Gay-Lussac pour l'émanation.

Condensation de l'émanation.

MM. Rutherford et Soddy ont montré que l'émanation du radium se condense dans l'air liquide. Un courant d'air chargé d'émanation perd ses propriétés radioactives en traversant un serpentin plongé dans l'air liquide. L'émanation revient à son état primitif si l'on ramène le serpentin à la température ambiante; cette vaporisation se

fait vers — 150 degrés. La température de condensation de l'émanation serait donc de — 150 degrés.

Ce phénomène peut être mis en évidence, d'une manière très brillante, au moyen de l'appareil suivant (fig. 35) : une solution d'un sel de radium est placée en A dans un réservoir en verre qui peut communiquer, par l'intermédiaire de tubes *t* et *t'* et de robinets R et R', avec deux réservoirs B et C, enduits intérieurement de sulfure de zinc phosphorescent et dans lesquels on a préalablement fait le

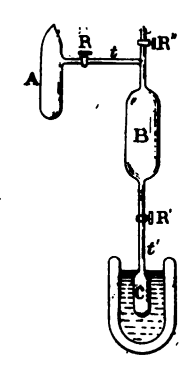


Fig. 35. — Condensation de l'émanation dans l'air liquide.

vide. Si l'on porte l'appareil dans l'obscurité, le tube A seul est faiblement lumineux, mais si l'on ouvre le robinet R, l'émanation accumulée dans le tube A est aspirée et se répand dans le réservoir B en provoquant d'une façon intense la phosphorescence du sulfure de zinc qui y est contenu. Si maintenant on ouvre le robinet R', le réservoir C s'illumine à son tour. En même temps, on constate une diminution dans la luminosité de B : l'émanation se partage dans le rapport du volume de B à la somme des volumes de B et de C Enfin, si l'on plonge le réservoir C dans l'air liquide, ce réservoir augmente de luminosité pendant que l'éclat de B disparaît : l'émanation s'écoule, en effet, peu à peu du réservoir B pour venir se condenser en C dans l'air liquide. On peut alors fermer le robinet R', et retirer l'appareil de l'air liquide ; toute l'émanation s'est accumulée dans la partie refroidie, le réservoir C seul est lumineux d'une façon très intense.

Distillation de la radioactivité induite.

Une lame de platine activée, puis chauffée, perd la plus grande partie de son activité. Si, pendant la chauffe, on entoure la lame activée d'une autre lame maintenue froide, on constate que cette deuxième lame devient radioactive. Il y a transport de radioactivité. Le phénomène est du reste assez complexe. Les lois de désactivation des lames ainsi activées dépendent de la température à laquelle s'est effectuée la distillation. Dans ce phénomène, on peut admettre que c'est l'activité qui distille de la lame activée; la radioactivité induite des corps solides ne serait due qu'à une émanation condensée sur ceux-ci. L'ensemble des résultats obtenus permet de supposer que la radioactivité acquise par les corps solides affecte trois états successifs principaux et distincts. L'action de la température permet de les distinguer.

Radioactivité induite sur les substances qui ont séjourné en dissolution avec les sels de radium.

Quand on laisse en contact pendant quelque temps un sel dissous avec une solution de sel de radium, le sel prend une certaine activité et, si on le sépare du radium, il possède une activité induite. On peut, par exemple, activer par cette méthode un sel de baryum. Ce baryum activé reste actif après diverses transformations chimiques : son activité est donc une propriété atomique assez stable. Le chlorure de baryum activé se fractionne comme du chlorure de baryum radifère, les parties les plus actives étant les moins solubles dans l'eau et l'acide chlorhydrique étendu. Le chlorure sec est spontanément lumineux; son rayonnement de Becquerel est analogue à celui du chlorure de baryum radifère. L'activité d'un tel produit peut atteindre mille fois celle de l'uranium. Cependant, au spectre, aucune des raies du radium ne peut être constatée; de plus, l'activité du produit diminue et, au bout de trois semaines, elle est trois fois plus faible qu'au début.

Activité induite produite par des agents autres que les substances radioactives.

Il est intéressant de noter que divers essais ont été faits en vue de produire la radioactivité induite en dehors des substances radioactives. M. Villard a soumis à l'action des rayons cathodiques un morceau de bismuth placé comme anticathode dans un tube de Crookes ; ce bismuth a été ainsi rendu actif, du reste d'une façon extrêment faible, car il fallait huit jours de pose pour obtenir une impression photographique. M. Mac Lennan a préparé des sels capables de décharger les corps chargés positivement.

Les études de ce genre offrent un grand intérêt. Si, en se servant d'agents physiques connus, il était possible de créer dans les corps primitivement inactifs une radioactivité notable, on pourrait espérer trouver ainsi la cause de la radioactivité spontanée de certaines matières.

Présence de l'émanation dans l'air et dans les eaux de source.

MM. Elster et Geitel ont montré que l'air atmosphérique conduit toujours l'électricité d'une façon sensible : il est toujours légèrement ionisé. Cette ionisation semble due à des causes multiples. D'après les travaux de MM. Elster et Geitel, l'air atmosphérique renferme en très petite proportion une émanation analogue à celle émise par les corps radioactifs. Au sommet des montagnes, l'air atmosphérique contient plus d'émanation que dans la plaine ou au bord de la mer. Enfin l'air des caves et des cavernes est particulièrement chargé d'émanation. On obtient encore de l'air très riche en émanation en aspirant, au moyen d'un tube enfoncé dans le sol, l'air qui y est contenu.

On a reconnu la présence de l'émanation du radium dans les gaz extraits de certaines eaux minérales naturelles. Il est possible que les actions physiologiques curatives de ces eaux soient dues en partie aux

principes radioactifs qui y sont contenus. Il y a là, pour la [illegible] logie, une question d'une très grande importance.

L'air provenant des eaux de mer ou de rivière est à peu près [illegible] l'émanation.

Dès le début de leurs recherches, MM. Elster et Geitel se s[illegible] demandé si la radioactivité acquise par l'air était due à un co[illegible] contenu dans l'air lui-même, et, dans ce cas, la source de l'ém[illegible] serait inséparable de l'air, ou si il existait en dehors de l'air. Il fallait déterminer par quelle voie l'émanation y parvenait. [illegible]nier point a été facilement élucidé.

MM. Elster et Geitel ont enfermé, dans une chaudière, un [illegible] volume d'air de 25 mètres cubes. Ils déterminaient la radioac[illegible] l'air en tendant à l'intérieur de la chaudière des fils d'alum[illegible] portés à un potentiel négatif élevé. Ils déterminaient ensuite l[illegible] acquise par le fil. Une expérience effectuée dans ces conditio[illegible] sieurs semaines après la fermeture de la chaudière, a donné de[illegible] tats négatifs, les fils qui s'activaient au début sont restés i[illegible] quelques semaines après; il n'y a donc pas de corps radioac[illegible] l'air. La source de l'émanation ne peut être qu'extérieure.

La teneur exceptionnellement grande en émanation de l'[illegible] caves et des grottes a conduit à la conclusion que cette derni[illegible] provenir des parois, ou du moins sortir par diffusion du so[illegible] tonnant.

Cette conclusion a été pleinement vérifiée par l'expérienc[illegible] aspiré du sol est radioactif. Si l'on enfonce de quelques cent[illegible] dans le sol une grande cloche métallique, on a un appareil q[illegible] tionne comme source permanente d'air chargé d'émanation.

En mer, où les sorties de gaz du sol font défaut, l'émana[illegible] beaucoup plus faible que sur la terre ferme.

Les eaux provenant de sources profondes, et surtout les eau[illegible] males, sont très riches en émanation, il en est de même du [illegible] brut qui n'a pas été raffiné par distillation. Il est logique de [illegible] que ces liquides ont recueilli l'émanation des corps radioactifs ré[illegible] dans le sol. MM. Elster et Geitel ont pu séparer des produit[illegible] actifs de matières telles que les argiles (argiles de Fango) e[illegible] tous les cas, ils ont retrouvé les phénomènes produits par le r[illegible]

Il semble donc que ce sont des traces infinitésimales de radium répandues partout qui sont la source de la radioactivité de l'air enfermé dans les pores de la terre et de l'air atmosphérique.

Il est possible que les actions physiologiques de l'air des montagnes et de certaines régions soient dues en partie à l'émanation contenue dans l'air.

Nature de l'émanation.

M. Rutherford admet que l'émanation du radium est un gaz matériel radioactif, de la famille de l'argon. Les propriétés précédemment énoncées tendent en effet à montrer qu'à bien des points de vue, l'émanation du radium se comporte comme un gaz véritable.

Quand on met en communication deux réservoirs en verre, dont l'un contient de l'émanation tandis que l'autre n'en contient pas, l'émanation se diffuse dans le deuxième réservoir et, quand l'équilibre est établi, on constate que l'émanation s'est partagée entre les deux réservoirs dans le rapport des volumes. L'émanation obéit aux lois de Mariotte et Gay-Lussac; elle se diffuse dans l'air, suivant la loi de diffusion des gaz; enfin, elle se condense à basse température, comme un gaz liquéfiable.

Cependant, certains points sont encore bien difficiles à interpréter à l'heure actuelle par cette hypothèse. Ainsi, on n'a pas encore observé de pression due à l'émanation, ni la présence bien nette d'un spectre caractéristique. Aucune réaction chimique n'a pu être obtenue avec l'émanation. Enfin, toutes nos connaissances relatives aux propriétés de l'émanation résultent de mesures de radioctivité.

Il convient toutefois d'ajouter que les recherches récentes sur l'émanation donnent une grande valeur à l'hypothèse d'un gaz matériel radioactif.

Dégagement d'hélium produit par les sels de radium.

MM. Ramsay et Soddy ont constaté la présence d'hélium dans les gaz qui ont séjourné un certain temps dans une ampoule scellée contenant un sel de radium.

La présence de l'hélium s'est manifestée d'une façon constante dans diverses expériences, et ce gaz a pu être nettement caractérisé par son spectre, obtenu au moyen d'un tube de Geissler. Les raies de l'hélium étaient, de plus, accompagnées de trois raies inconnues.

MM. Ramsay et Soddy ont fait une autre série d'expériences, dans laquelle ils accumulaient l'émanation du radium par condensation dans l'air liquide; ils étudiaient ensuite le spectre de l'émanation au moyen d'un tube de Geissler. Ils ont retrouvé les raies nouvelles. Quant à l'hélium, il était absent du gaz au début des expériences, mais, peu à peu, le spectre de l'hélium est apparu et a augmenté d'intensité d'une façon permanente; d'autre part, les raies nouvelles disparaissaient peu à peu. Il résulte de là qu'il est possible de supposer que l'hélium est l'un des produits de destruction de l'émanation. Cette production d'hélium est liée à la disparition de l'activité du mélange gazeux.

Il est aisé de comprendre l'importance de ce résultat, qui peut s'interpréter en admettant que l'hélium a été créé par l'émanation du radium; on se trouverait là en présence d'un cas de transmutation des corps simples : le radium donnant naissance à l'hélium.

Ce résultat, si surprenant, est cependant en accord avec le fait que l'hélium se trouve seulement dans les minéraux contenant de l'uranium et du radium, et se dégage de ces minéraux quand on les chauffe.

Des expériences en cours tendent à confirmer d'une façon très nette ces résultats, d'une importance fondamentale.

CHAPITRE VIII

NATURE DES PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR LES SELS DE RADIUM

Dès le début de leurs recherches sur la radioactivité, M. et Mme Curie se sont demandé si la radioactivité n'était pas une propriété générale de la matière. A l'heure actuelle, il est impossible d'admettre que cette question soit résolue. Mme Curie a examiné un très grand nombre de corps et a démontré que ces diverses substances ne possédaient pas une activité supérieure à la centième partie de l'activité de l'uranium.

Cependant, M. Colson a montré que beaucoup de substances peuvent agir à la longue sur les plaques photographiques; quelques travaux récents tendent à confirmer ces faits.

L'examen rapide que nous venons de faire des propriétés des sels de radium montre que ces sels, ou plus généralement tous les corps radioactifs, constituent des sources d'énergie, qui se révèlent à nous sous forme de rayonnement de Becquerel, de production continue d'émanation, d'énergie électrique, chimique et lumineuse, et de dégagement continu de chaleur.

D'autre part, le radium paraît toujours conserver ses mêmes propriétés et ne pas se modifier : ces faits semblent en désaccord avec les principes fondamentaux de l'énergétique.

Comme nous avons encore grande confiance dans le principe de la conservation de l'énergie, la première question que nous devons nous poser est de savoir d'où peut provenir cette énergie.

On s'est souvent demandé si l'énergie *est créée* dans les corps radioactifs eux-mêmes, ou bien si elle est empruntée par ces corps à des *sources extérieures*. Ces deux manières de voir ont été le point de départ

de nombreuses hypothèses, parmi lesquelles nous en retiendrons deux qui paraissent à l'heure actuelle les plus satisfaisantes :

On peut, par exemple, supposer que le radium est un élément en voie d'évolution, que ses atomes se transforment lentement, mais d'une façon continue, et que l'énergie perçue par nous est l'énergie, sans doute considérable, mise en jeu dans la transformation des atomes; le fait que le radium dégage de la chaleur d'une manière permanente plaide en faveur de cette hypothèse. Cette transformation serait, d'autre part, accompagnée d'une perte de poids due à l'émission de particules matérielles et au dégagement continu d'émanation. A l'heure actuelle aucune variation de poids n'a été constatée avec certitude; toutefois, le fait que les sels de radium dégagent de l'émanation qui se transforme en hélium, permet de supposer que les sels de radium perdent du poids : ce dernier fait donne une valeur considérable à cette hypothèse. Du reste, des expériences sur la variation de poids, basées sur la détermination du poids de l'hélium produit, sont en cours.

La deuxième hypothèse consiste à supposer qu'il existe dans l'espace des rayonnements encore inconnus et inaccessibles à nos sens. Le radium serait capable d'absorber l'énergie de ces rayons hypothétiques et de les transformer en énergie radioactive.

Ces deux hypothèses ne sont peut-être pas incompatibles; en tout cas, bien des raisons sont à invoquer pour ou contre ces diverses manières de voir, et le plus souvent les essais de vérification expérimentale des conséquences de ces hypothèses ont donné des résultats négatifs.

Cet exposé, trop rapide, des propriétés des sels de radium, peut cependant donner une idée de l'importance du mouvement scientifique qui a été provoqué par la belle découverte de M. et Mme Curie. Ces physiciens ont fait faire à la science un progrès considérable.

En dehors de leur grand intérêt théorique, les phénomènes produits par les corps radioactifs donnent de nouveaux moyens d'investigation aux physiciens, aux chimistes, aux physiologistes et aux médecins.

Pour abstraites qu'elles soient *a priori*, les recherches de science pure conduisent plus vite qu'on n'est tenté de le croire à des résultats utilitaires.

BIBLIOGRAPHIE

HISTORIQUE

H. Poincaré, (Corps phosphorescents), *Revue générale des Sciences,* 30 janvier 1896.

Henry, (Corps phosphorescents), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXII, p. 312.

Niewenglowski, (Corps phosphorescents), *Comptes rendus de l'Académie des Siences,* t. CXXII, p. 386.

Troost, (Corps phosphorescents), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXII, p. 564.

H. Becquerel, (Uranium), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences :*
t. CXXII, p. 420 (24 février 1896);
t. CXXII, p. 501 (2 mars 1896).

RAYONNEMENT DE L'URANIUM ET DU THORIUM

H. Becquerel, (Uranium), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*
t. CXXII, p. 559 (9 mars 1896) ;
t. CXXII, p. 689 (23 mars 1896) ;
t. CXXII, p. 762 (30 mars 1896) ;
t. CXXII, p. 1086 (18 mai 1896) ;
t. CXXIII, p. 855 (23 novembre 1896) ;
t. CXXIV, p. 438 (1er mars 1897) ;
t. CXXIV, p. 800 (12 avril 1897).

G. C. Schmidt, (Thorium), *Verh. Phys. Ges.*, Berlin, t. XVII, 14 février 1898, et *Ann. der Phys. und Chem.*, Bd. LXV, s. 141, 1898.

Mme Sklodowska Curie, (Rayons du thorium et de l'uranium), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXVI, p. 1101 (12 avril 1898).

LES NOUVELLES SUBSTANCES RADIOACTIVES

M. et Mme P. Curie, (Sur une nouvelle substance radioactive), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXVII, p. 175 (18 juillet 1898).

M. et Mme P. Curie et M. Bémont, (Radium), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXVII, p. 1215 (26 décembre 1898).

Debierne, (Actinium), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences :*
t. CXXIX, p. 593 (16 octobre 1899) ;
t. CXXX, p. 906 (2 avril 1900).

MESURE DE L'INTENSITÉ DU RAYONNEMENT ET IONISATION DES GAZ

J. et P. Curie, *Journal de Physique,* 1882.

J. Curie, *Annales de Physique et de Chimie,* 1889 ; *Lumière électrique,* 1888.

H. Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXIV, p. 800, 1897.

Kelvin, Beattie et Smolan, *Nature,* t. LVI, 1897.

Beattie et Smoluchowski, *Philos. Mag.*, t. XLIII, p. 418.

Rutherford, *Philos. Mag.*, janvier 1899.

Langevin, *Recherches sur les gaz ionisés* (Thèse de la Faculté des Sciences de Paris), 1902.

H. Becquerel, *Mémoires de l'Académie des Sciences.* (Recherches sur une propriété nouvelle de la matière), 1903.

MINÉRAUX RADIOACTIFS

Mme Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* avril 1898.

EXTRACTION DU RADIUM

Mme Curie, *Recherches sur les nouvelles substances radioactives,* 1903.

SPECTRE DU RADIUM

Demarçay, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* décembre 1898, novembre 1899, juillet 1900.

C. Runge, *Ann. der Phys.,* Bd II, s. 742 (11 juin 1900).

G. Berndt, *Physik. Zeitschr.,* Bd II, s. 181 (7 décembre 1900).

F. Giesel, *Physik. Zeitschr.,* Bd III, n° 24, s. 578 (9 septembre 1902).

Giesel, *Physik. Zeitschr.,* 15 septembre 1902.

Runge et Precht, *Physik. Zeitschr.,* t. IV, p. 285, 1903.

POIDS ATOMIQUE DU RADIUM

Mme Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 13 novembre 1899, août 1900, 21 juillet 1902, Thèse de doctorat, 1903; *Physik. Zeitschr.,* 1903, p. 456.

Marshall Watts, *Philos. Mag.,* t. VI, p. 64 (juillet 1903).

Martin, *Chem. News,* t. LXXXIII, p. 130, 1901.

Mme Curie, *Physik. Zeitschr.,* 28 mars 1903; t. IV, s. 456 (15 mai 1903).

CHALEUR DÉGAGÉE PAR LE RADIUM

P. Curie et Laborde, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 16 mars 1903.

P. Curie, Roy. Inst., 19 juin 1903.

E. Rutherford et Barnes, *Philos. Mag.,* février 1904.

RAYONNEMENT DU RADIUM

M. et Mme Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 20 novembre 1899, 8 janvier 1900, p. 73 et p. 76; 5 mars 1900 (charge électrique des rayons); 17 février 1902 (conductibilité des liquides sous l'action des rayons).

Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 4 et 11 décembre 1899, 26 décembre 1899, 29 janvier 1900, 12 février 1900, 9 avril 1900, 30 avril 1900.

P. Curie et G. Sagnac, (Rayons secondaires), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1013 (9 avril 1900).

Dorn, (Rayons du radium), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1126 (23 avril 1900).

Villard, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1178 (30 avril 1900).

Giesel, *Wied Ann.*, t. LXIX, p. 91 et p. 834.

S. Meyer et V. Schweidler, Académie de Vienne, 7 décembre 1899, 3 et 9 novembre 1899.

Kauffmann, *Nachrichten der K. Gesel. d. Wiss. zu Gœttingen*, 1901, Heft 2.

Rutherford, *Philos. Mag.*, 1902, t. IV, p. 1. *Rayons α du radium.*

Rutherford, *Philos. Mag.*, février 1903.

Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 26 janvier 1903, 16 février 1903, juin 1903.

Des Coudres, *Physik. Zeitschr.*, 1er juin 1903.

William Crookes, (Spinthariscope), *Chemical News*, 3 avril 1903.

J. Stark, (Rayons α), 7 juillet 1903, *Physik. Zeitschr.*, t. IV, s. 583 (1er août 1903).

PHOSPHORESCENCE PRODUITE PAR LE RAYONNEMENT

J. J. Bargmann, (Thermo-luminescence), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 896 (26 avril 1897).

W. Arnold, (Luminescence), *Ann. der Physik und Chemie*, Bd. LXI, s. 324 (1er juin 1897).

Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 912 (4 décembre 1899).

P. Bary, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 776 (19 mars 1900).

E. Wiedemann, (Thermo-luminescence), *Physik. Zeitschr.*, t. II, p. 269, 1901.

A. de Hemptinne, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 934 (2 décembre 1901).

EFFETS CHIMIQUES DU RAYONNEMENT

M. et Mme Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 823 (20 novembre 1899).

Berthelot, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 659 (28 octobre 1901).

H. Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 709 (4 novembre 1901).

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU RAYONNEMENT DU RADIUM

Walkhoff, phot. Rundschau, octobre, 1900.

Giesel, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, t. XXIII.

Becquerel et Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXII, p. 1289. *Action sur l'œil.*

Giesel, *Naturforscherversammlung*, 1899.

Himstedt et Nagel, *Ann. der Physik.*, t. IV, 1901.

Danlos, Soc. de dermatologie, 7 novembre 1901.

Aschkinas et Caspari, *Ann. der Physik.*, t. VI, p. 570, 1901.

Danysz, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 19 février 1903.

Bohn, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 27 avril et 4 mai 1903. *Traitement du lupus.*

Hallopau et Gadaud, Soc. de dermatologie, 3 juillet 1902.

Blandamour, thèse, Faculté de Médecine de Paris, 1902.

RADIOACTIVITÉ INDUITE ET ÉMANATION DU RADIUM

P. Curie et Mme Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 6 novembre 1899.

P. Curie et Debierne, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 1901 (cinq notes).

P. Curie, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 17 novembre 1902, 26 janvier 1903.

P. Curie et J. Danne, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 9 février 1903.

Dorn, Abhand. Naturforsch. Ges. Halle, juin 1900.

A. Debierne, (Baryum radioactif artificiel), *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXI, p. 333 (30 juillet 1900).

Rutherford, *Physik. Zeitschr.,* 20 avril 1901 et 15 février 1902.

Rutherford et Miss Brooks, *Chem. News,* 25 avril 1902.

Rutherford et Soddy, J. Chem. Soc. London, avril 1902.

Rutherford, *Physik. Zeitschr.,* 15 mars 1902 et *Philos. Mag.,* novembre 1902 et janvier 1903.

Rutherford et Soddy, (Condensation des émanations), J. Chem. Soc. London, 19 novembre 1902, et *Philos. Mag.,* mai 1903.

DIFFUSION DE L'ÉMANATION

P. Curie et J. Danne, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 2 juin 1903.

LUMIÈRE ÉMISE PAR LES SELS DE RADIUM

Sir W. Huggins et Lady Huggins, *Proc. Roy. Soc.,* vol. LXXII, p. 196 (17 juillet, 5 août 1903).

RADIOACTIVITÉ DE L'ATMOSPHÈRE ET DES EAUX DE SOURCE

Elster et Geitel, *Physik. Zeitschr.*, 1900 et 1901.

Wilson, *Proc. Royal Soc. London,* 1901.

Rutherford et Allen, *Philos. Mag.*, 24 décembre 1902.

Elster et Geitel, *Physik. Zeitschr.*, 15 septembre 1902.

Mac Lennan, *Philos. Mag.*, t. V, p. 419.

Mac Lennan et Burton, *Philos. Mag.*, juin 1903.

Saake, *Physik. Zeitschr.*, 1903.

Lester Cooke, *Philos. Mag.*, octobre 1903.

J.-J. Thomson, *Conduction of electricity thraugh gases,* Cambridge 1903.

J. Elster et H. Geitel, *Arch. des Sc. Phys. et Nat.*, février 1902. Genève.

— janvier 1904.

S. S. Allan, *Philos. Mag.*, février 1904.

GAZ DÉGAGÉS PAR LE RADIUM

E. Rutherford et Miss H. T. Brooks, *Trans. of the Roy. Soc. of Canada,* vol. VII, sec. III, p. 21 (23 mai 1901).

Giesel, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 1903, p. 347.

Ramsay et Soddy, *Physik. Zeitschr.*, 15 septembre 1903.

DÉGAGEMENT D'HÉLIUM

W. Ramsay et F. Soddy, *Physik. Zeitschr,* t. IV, s. 651 (15 septembre 1903). — *Nature,* t. LXVIII, p. 354 (13 août 1903). — *Proc. Roy. Soc.*, t. LXXII, p. 204 (1903).

Curie et Dewar, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* février 1904.

PERTE DE POIDS DU RADIUM

E. Dorn, 8 juin 1903 : *Physik. Zeitschr.*, t. IV, s. 530 (1er juillet 1903).

RADIOACTIVITÉ DE LA MATIÈRE ET NATURE DE LA RADIOACTIVITÉ

W. Crookes, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVIII, p. 176 (16 janvier 1899).

H. Becquerel, *Nature*, t. LXIII, p. 396 (21 février 1901).

E. Rutherford et G. Soddy, *Philos. Mag.*, t. IV, p. 370 (septembre 1902).

Philos. Mag., t. IV, p. 569 (novembre 1902).

Strutt, *Philos. Trans.*, 1901 ; *Philos. Mag.*, juin 1903.

Mac Lennan et Burton, *Philos. Mag.*, juin 1903.

Lester Cooke, *Philos. Mag.*, octobre 1903.

R. J. Strutt, *Philos. Mag.*, t. VI, p. 113 (juillet 1903).

J.-J. Thomson, *Nature*, t. LXXII, p. 601 (1903).

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

Préface 5
Historique 9

CHAPITRE PREMIER.

Mesure de l'intensité du rayonnement des substances radioactives.

Méthode photographique 13
Méthode électrique 15

CHAPITRE II.

Extraction des sels de radium.

Minerais 21
Traitement de la pechblende 22

CHAPITRE III.

Caractères des sels de radium.

Caractères chimiques 26
Coloration de la flamme et spectre 26
Poids atomique 27
Luminosité des sels de radium 28
Dégagement de chaleur des sels de radium 28
Variations d'activité des sels de radium 30
Rayonnement et radioactivité induite produits par les sels de radium. 31

CHAPITRE IV.

Le rayonnement des sels de radium.

Séparation des différents groupes de rayons 32
Rayons α 34
Rayons β 35
Rayons γ 41



